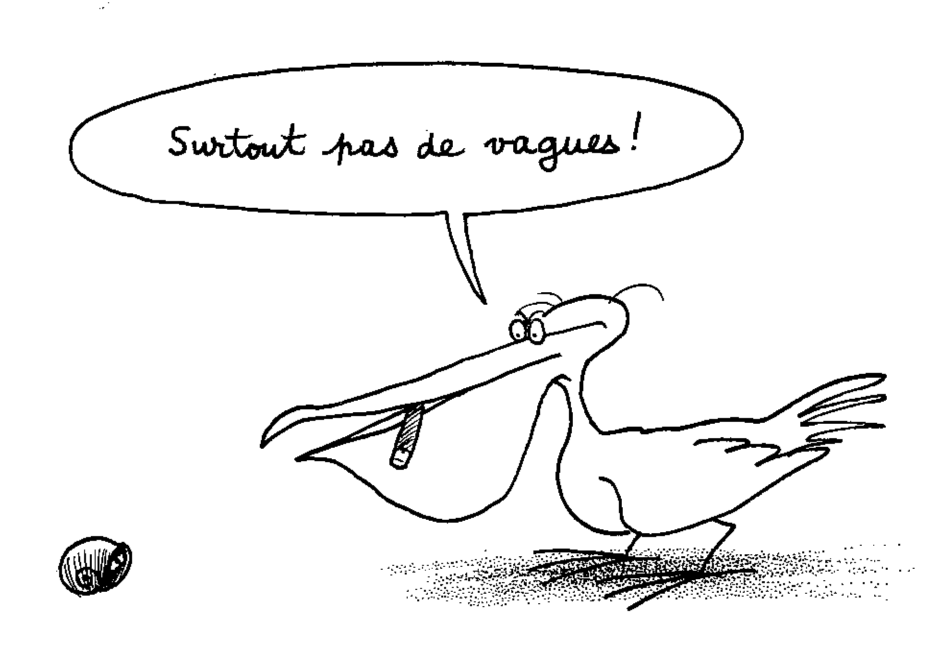
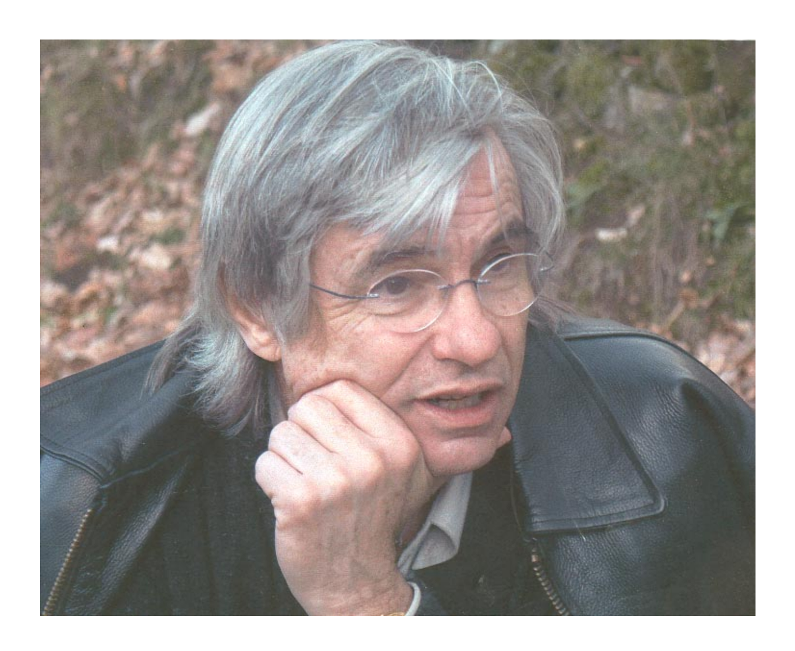
LE MUR DU SILENCE

par Jean-Pierre Petit



Savoir sans Frontières

Association Loi de 1901



Jean-Pierre Petit, Président de l'Association

Ancien Directeur de Recherche au Cnrs, astrophysicien, créateur d'un genre nouveau : la Bande Dessinée Scientifique. Crée en 2005 avec son ami Gilles d'Agostini l'association Savoir sans Frontières qui s'est donnée pour but de distribuer gratuitement le savoir, y compris le savoir scientifique et technique à travers le monde. L'association, qui fonctionne grâce à des dons, rétribue des traducteurs à hauteur de 150 euros (en 2007) en prenant à sa charge les frais d'encaissement bancaire. De nombreux traducteurs accroissent chaque jour le nombre d'albums traduits (en 2007 : 200 albums gratuitement téléchargeables, en 28 langues, dont le Laotien et le Rwandais).
Le présent fichier pdf peut être librement dupliqué et reproduit, en tout ou en partie, utilisé par les enseignants dans leurs cours à conditions que ces opérations ne se prêtent pas à des activités lucratives. Il peut être mis dans les bibliothèques municipales, scolaires et universitaires, soit sous forme imprimée, soit dans des réseaux de type Intranet.
L'auteur a entrepris de compléter cette collection par des albums plus simples d'abord (niveau 12 ans). Egalement en cours d'élaboration : des albums « parlants » pour analphabètes et « bilingues » pour apprendre des langues à partir de sa langue d'origine.
L'association recherche sans cesse de nouveaux traducteurs vers des langues qui doivent être leur langue maternelle, possédant les compétences techniques qui les rendent aptes à produire de bonne traductions des albums abordés.

Pour contacter l'association, voir sur la homepage de son site

http://www.savoir-sans-frontieres.com

Coordonnées bancaires France ➔ Relevé d'Identité Bancaire (RIB) :

Etablissement	Quichet	N° de Compte	Cle RIB
20041	01008	1822226V029	88

Domiciliation : La banque postale
Centre de Marseille
13900 Marseille CEDEX 20
France

For other countries ➔ International Bank Account Number (IBAN) :

IBAN
FR 16 20041 01008 1822226V029 88

and ➔ Bank Identifier Code (BIC) :

BIC
PSSTFRPPMAR

Les statuts de l'association (en français) sont accessibles sur son site. La comptabilité y est accessible en ligne, en temps réel. L'association ne prélève sur ces dons aucune somme, en dehors des frais de transfert bancaire, de manière que les sommes versées aux traducteurs soient nettes.

L'association ne salarie aucun de ses membres, qui sont tous des bénévoles. Ceux-ci assument eux-mêmes les frais de fonctionnement, en particulier de gestion du site, qui ne sont pas supportés par l'association.

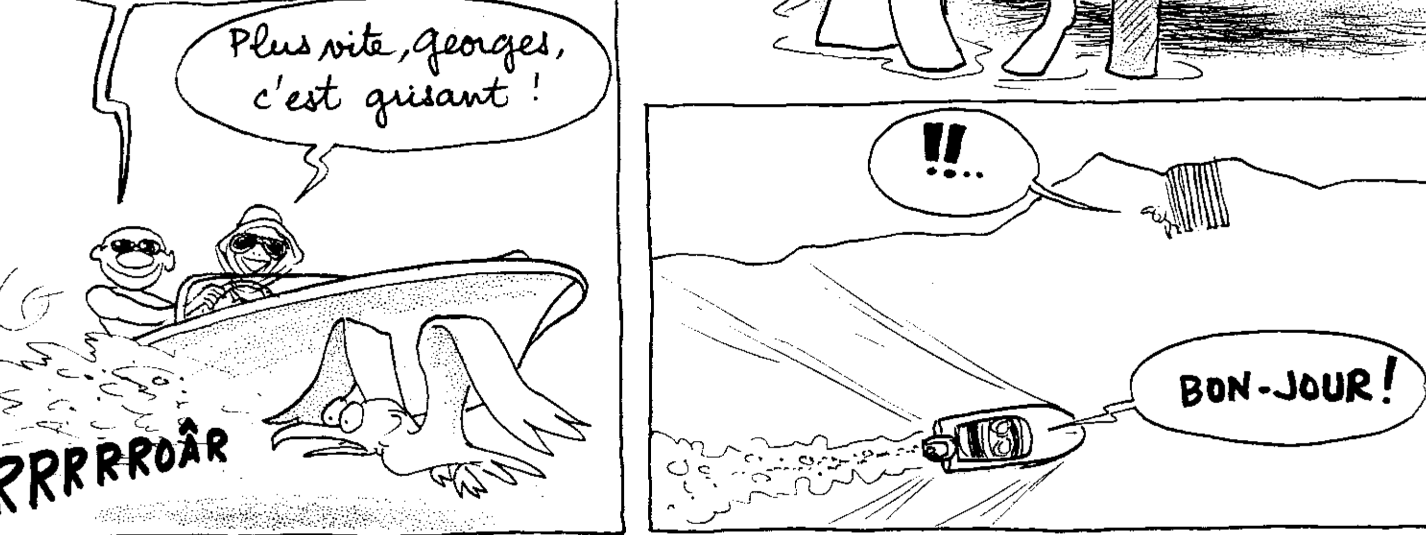
Ainsi, vous pourrez être assurés, dans cette sorte « d'œuvre humanitaire culturelle » que quelle que soit la somme que vous donniez, elle sera *intégralement* consacrée à rétribue les traducteurs.

Nous mettons en ligne en moyenne une dizaine de nouvelles traductions par mois.

PROLOGUE



Je suis content de ces vacances au bord de la mer.
oui, c'est pas mal.
Et Anselme, qu'est-ce qu'il fait ?
Il doit encore bricoler quelquechose...
Je crois qu'il est en train de fabriquer un appontement.

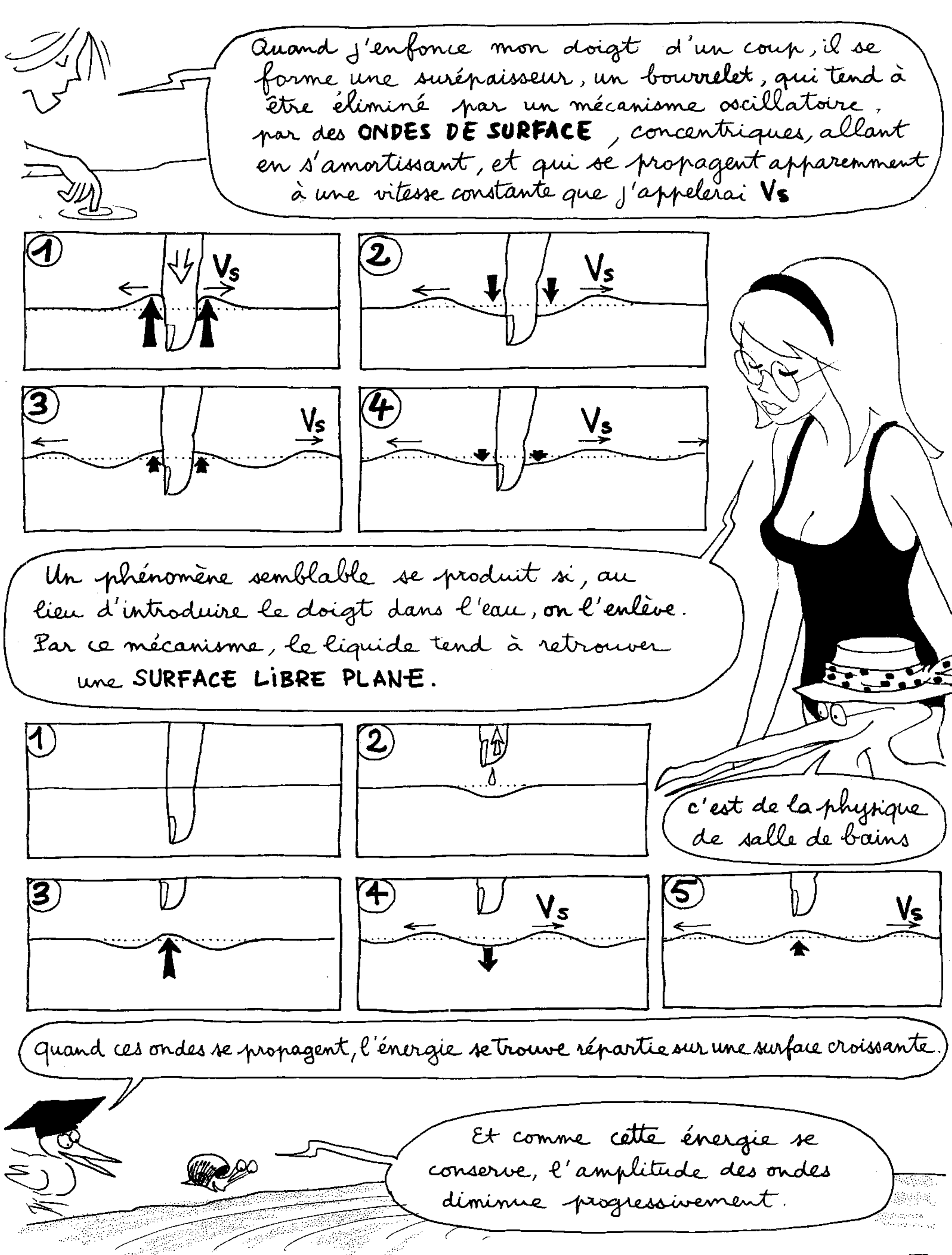


Allons voir là-bas.
Plus vite, georges, c'est grisant !
RRRRROÂR
!!...
BON-JOUR !

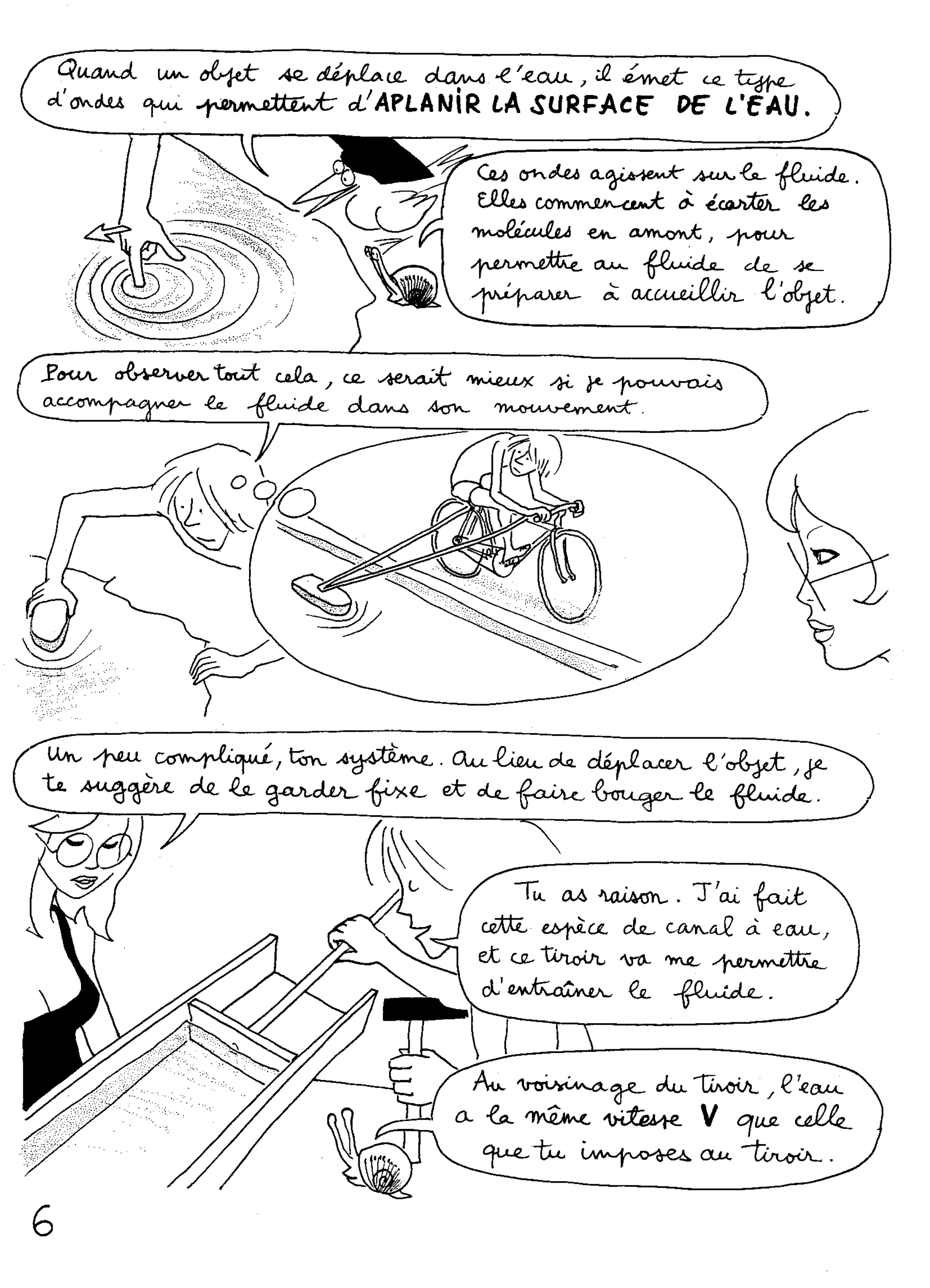


ça y est, ça recommence !
georges, je me sens VIVRE !
RRRR RROÂR

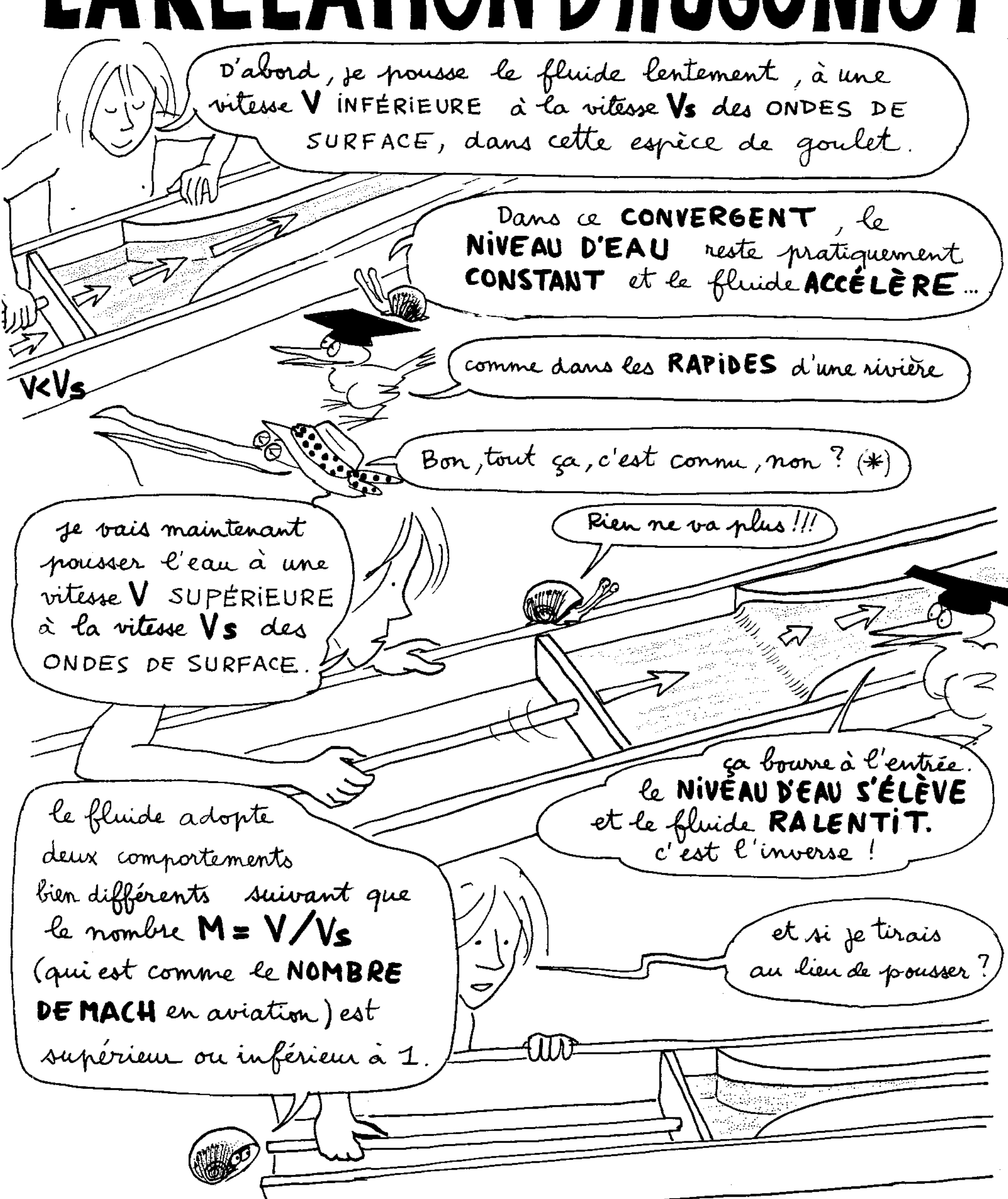

Encore lui, avec son stupide bateau!
RRRROÂR
Une fois de plus, il a démoli mon appontement
J'avais choisi un endroit bien abrité, mais je ne sais pas ce qui se passe: chaque fois qu'il vient, l'eau s'agite terriblement.
c'est sa VAGUE D'ÉTRAVE qui brise tout !
c'est peut-être la vague d'étrave. Mais le résultat est que tout est de nouveau par terre !
LES ONDES DE SURFACE
Ras le bol!
Tiens, là encore on retrouve des ondes. Voyons cela de plus près.
Des ronds dans l'eau. Et alors?



Quand j'enfonce mon doigt d'un coup, il se forme une surépaisseur, un bourrelet, qui tend à être éliminé par un mécanisme oscillatoire, par des ONDES DE SURFACE, concentriques, allant en s'amortissant, et qui se propagent apparemment à une vitesse constante que j'appelerai Vs
1
Vs
2
Vs
3
Vs
4
Vs
Un phénomène semblable se produit si, au lieu d'introduire le doigt dans l'eau, on l'enlève. Par ce mécanisme, le liquide tend à retrouver une SURFACE LIBRE PLANE.
c'est de la physique de salle de bains
1
2
3
4
Vs
5
Vs
quand ces ondes se propagent, l'énergie se trouve répartie sur une surface croissante.
Et comme cette énergie se conserve, l'amplitude des ondes diminue progressivement.


Quand un objet se déplace dans l'eau, il émet ce type d'ondes qui permettent d'APLANIR LA SURFACE DE L'EAU.
Ces ondes agissent sur le fluide. Elles commencent à écarter les molécules en amont, pour permettre au fluide de se préparer à accueillir l'objet.
Pour observer tout cela, ce serait mieux si je pouvais accompagner le fluide dans son mouvement.
Un peu compliqué, ton système. Au lieu de déplacer l'objet, je te suggère de le garder fixe et de faire bouger le fluide.
Tu as raison. J'ai fait cette espèce de canal à eau, et ce tiroir va me permettre d'entraîner le fluide.
Au voisinage du tiroir, l'eau a la même vitesse V que celle que tu imposes au tiroir.

LA RELATION D'HUGONIOT



(*) Voir **SI ON VOLAIT?** du même auteur

Quand tu tires doucement et que la vitesse du fluide **V** reste partout INFÉRIEURE à la vitesse **Vs** des ONDES DE SURFACE, l'eau **RALENTIT** dans ce **DIVERGENT** et la hauteur d'eau reste pratiquement constante.

V<Vs

V<Vs

"NOMBRE DE MACH"
M<1

En revanche, quand je tire le tiroir vigoureusement, l'écoulement ne suit plus. La surface de l'eau **S'ABAISSE**, et, dans ce **DIVERGENT**, le fluide au contraire **ACCÉLÈRE**.

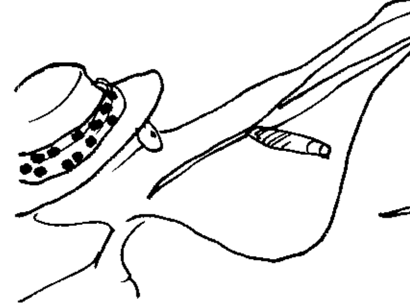
V>Vs

V>Vs

"NOMBRE DE MACH"
M>1

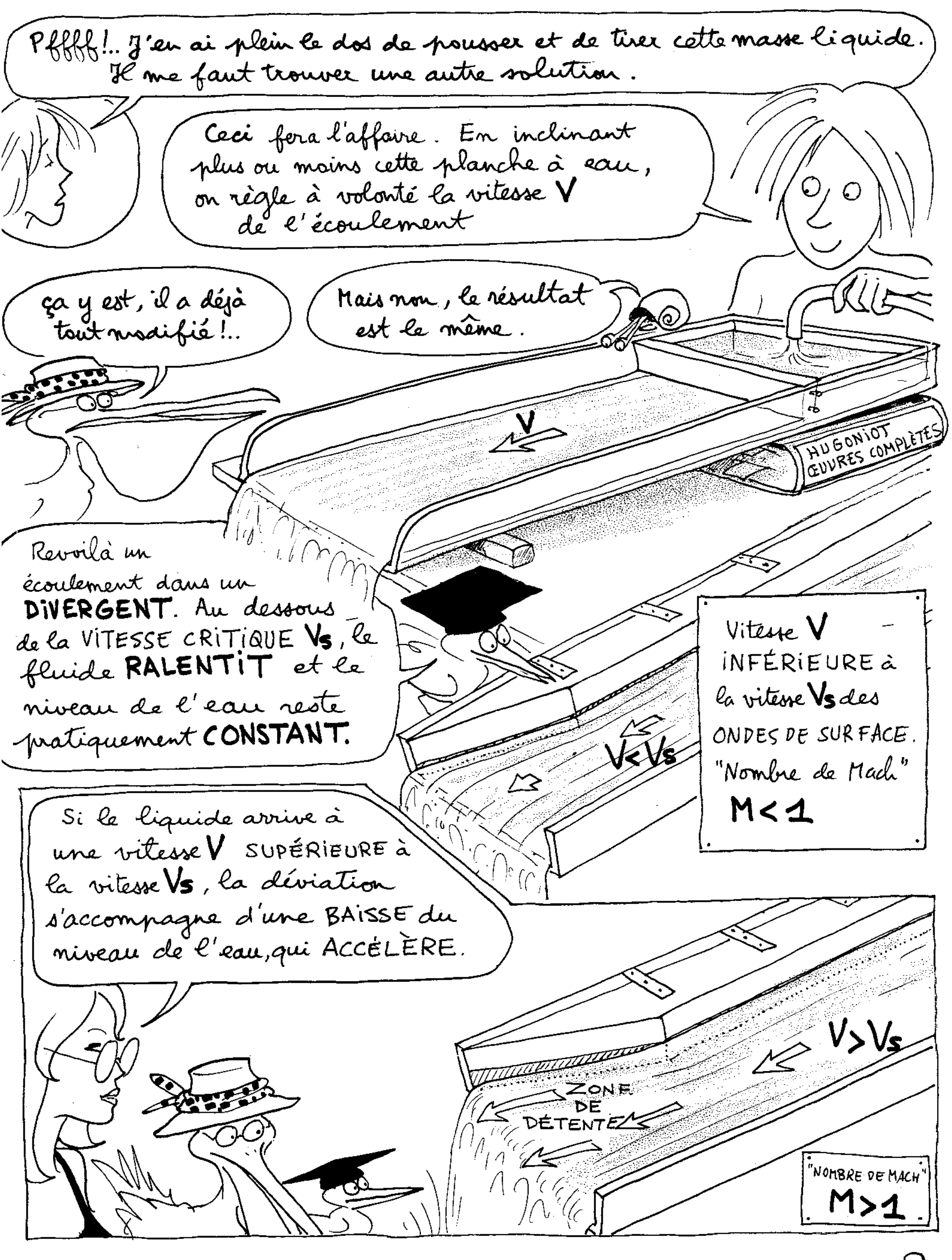
ces deux comportements radicalement différents sont résumés dans le théorème du physicien français HUGONIOT:

Hugoniot	Vitesse **V** INFÉRIEURE à la vitesse **Vs** des ONDES DE SURFACE ("Mach" **M** inférieur à 1	Vitesse **V** SUPÉRIEURE à la vitesse **Vs** des ONDES DE SURFACE "Mach" **M** supérieur à 1
Dans un **CONVERGENT** le fluide : le niveau d'eau :	**ACCÉLÈRE** **RESTE CONSTANT**	**RALENTIT** **MONTE**
Dans un **DIVERGENT** Le fluide : le niveau d'eau :	**RALENTIT** **RESTE CONSTANT**	**ACCÉLÈRE** **BAISSE**

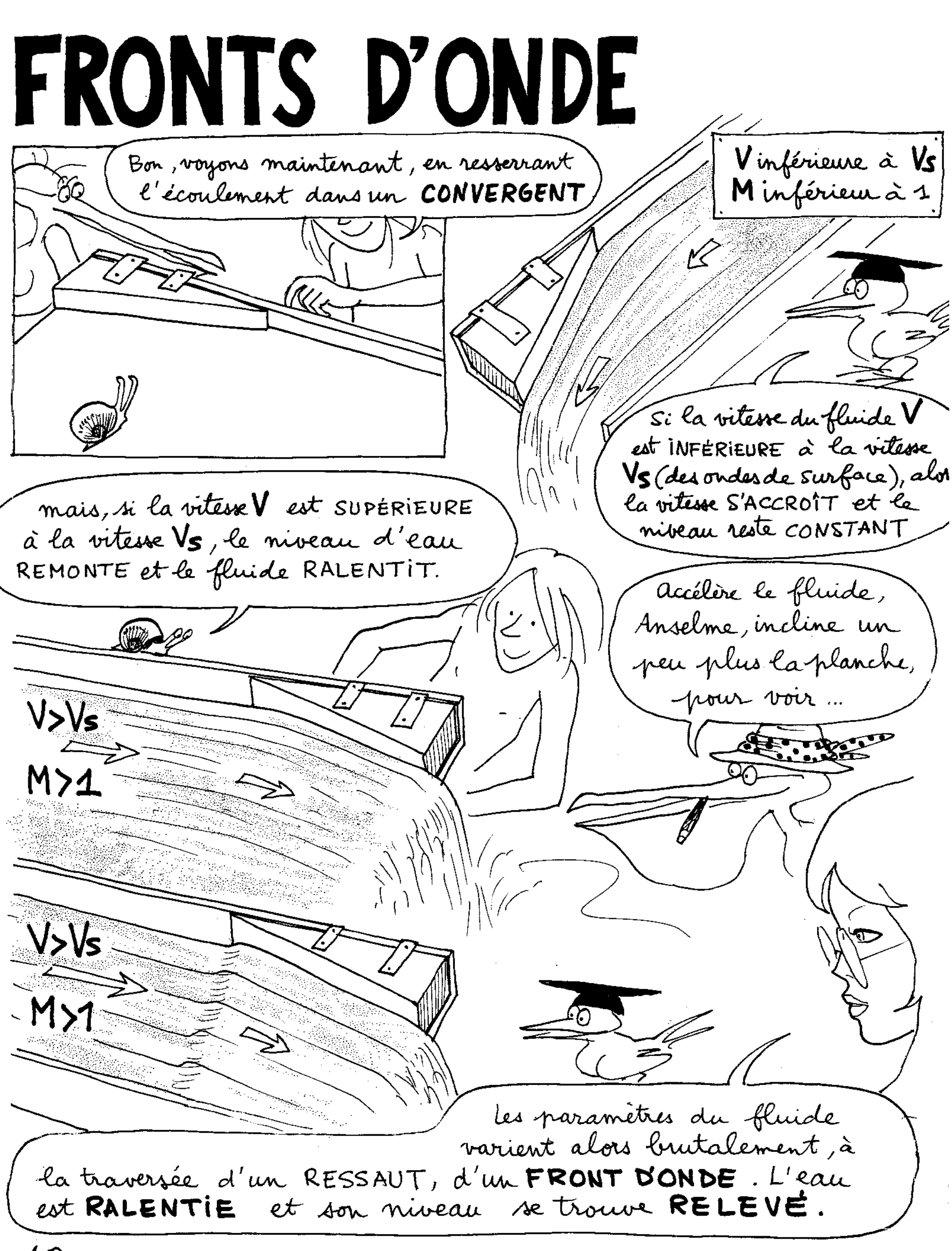


Voyons. Plus on va moins vite et moins la vitesse est plus grande... à moins que cela ne soit l'inverse ?...

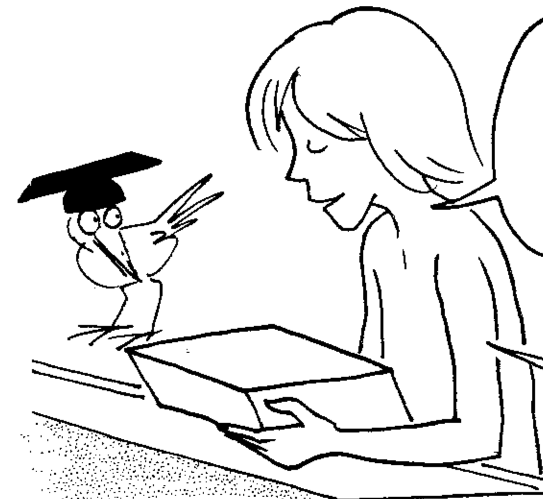
HiHiHi...


Pffff!.. J'en ai plein le dos de pousser et de tirer cette masse liquide. Il me faut trouver une autre solution.
Ceci fera l'affaire. En inclinant plus ou moins cette planche à eau, on règle à volonté la vitesse V de l'écoulement
ça y est, il a déjà tout modifié!..
Mais non, le résultat est le même.
V
HUGONIOT ŒUVRES COMPLÈTES
Revoilà un écoulement dans un DIVERGENT. Au dessous de la VITESSE CRITIQUE Vs, le fluide RALENTIT et le niveau de l'eau reste pratiquement CONSTANT.
V<Vs
Vitesse V INFÉRIEURE à la vitesse Vs des ONDES DE SURFACE. "Nombre de Mach" M<1
Si le liquide arrive à une vitesse V SUPÉRIEURE à la vitesse Vs, la déviation s'accompagne d'une BAISSE du niveau de l'eau, qui ACCÉLÈRE.
V>Vs
ZONE DE DÉTENTE
"NOMBRE DE MACH" M>1

FRONTS D'ONDE



ÉCOULEMENT AUTOUR D'UN PROFiL



Maintenant que tout cela est au point, je vais enfin pouvoir étudier l'écoulement du fluide autour d'un **PROFiL**. Commençons par un régime où la vitesse du fluide V est INFÉRIEURE à la vitesse Vs.

Je vais schématiser une coque de bateau par une succession de TROIS dièdres.

le fluide s'accélère à l'étrave qui constitue un CONVERGENT.

$V < V_s$

ÉTRAVE

CONVERGENT

FLANC

DIVERGENT

POUPE

CONVERGENT

Hmm... effectivement ! La vitesse est MAXiMALE au niveau du second dièdre, du FLANC. Enfin le fluide RALENTiT progressivement jusqu'à la POUPE, en gardant sans cesse un NiVEAU CONSTANT jusqu'à ce qu'il retrouve sa vitesse amont.

les ONDES DE SURFACE, qui cheminent à la vitesse V_s peuvent remonter vers l'amont et transmettre de l'énergie au fluide. Ainsi "informé" de la venue d'un objet, le fluide a le temps de prendre ses dispositions pour se préparer à l'accueillir. Il commencera à s'écarter **AVANT** que l'objet ne soit sur lui

$V < V_s$

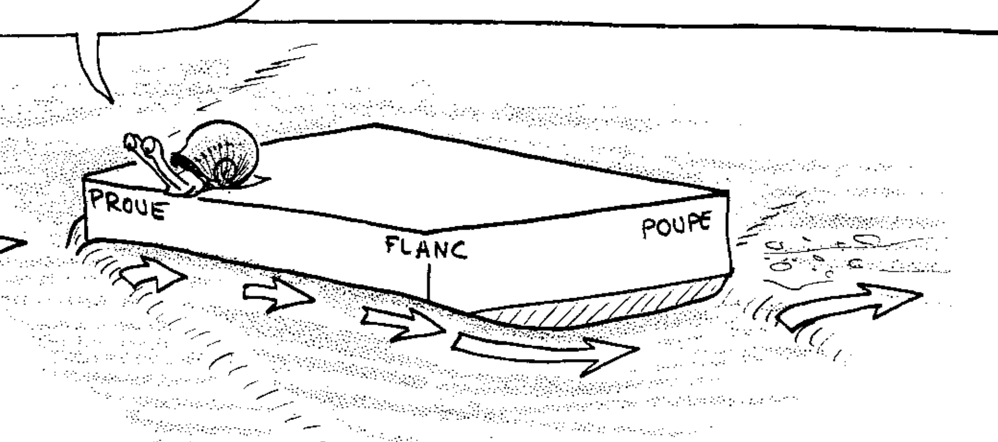
V_s

...ttention devant ! on arrive !..

maintenant, inclinons la planche un peu plus pour que la vitesse **V** de l'eau soit supérieure à la vitesse V_s des ondes de surface.

grâce au théorème d'Hugoniot, on sait que le fluide est ralenti à l'étrave, accéléré sur le flanc et enfin ralenti de nouveau à la poupe.

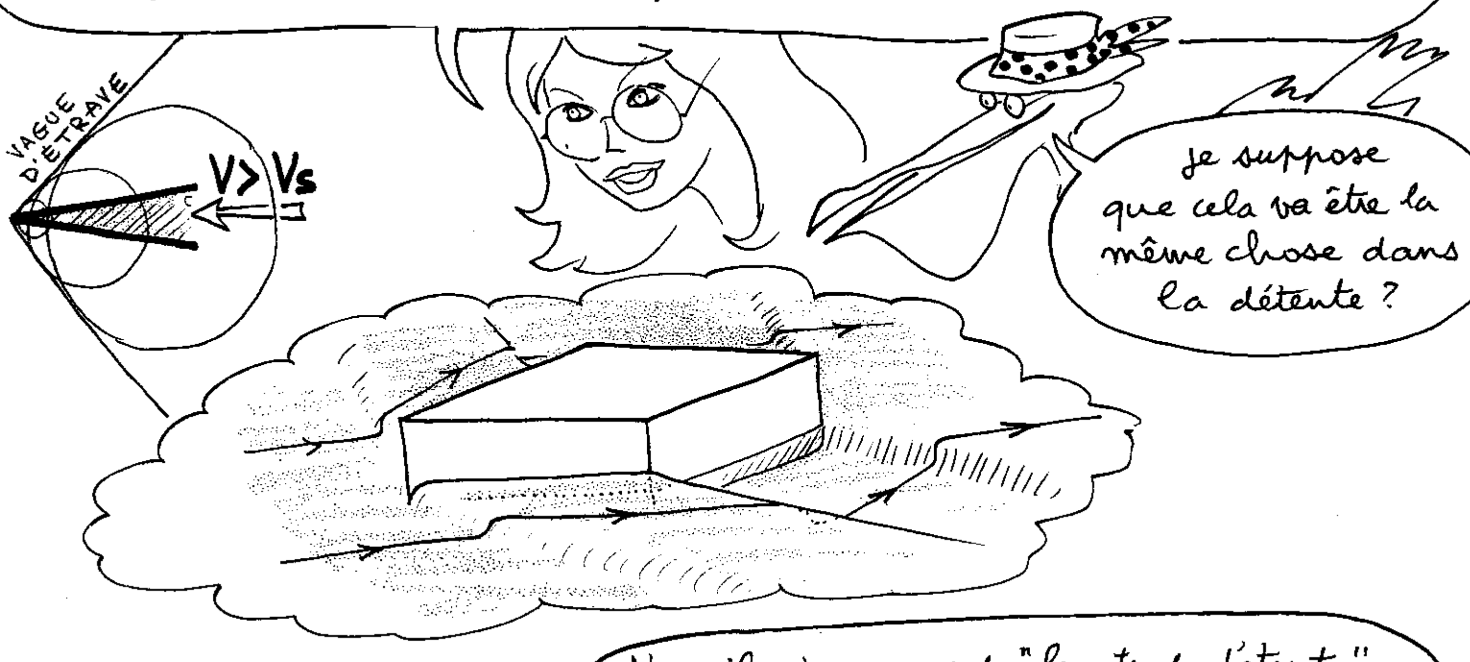
$V > V_s$



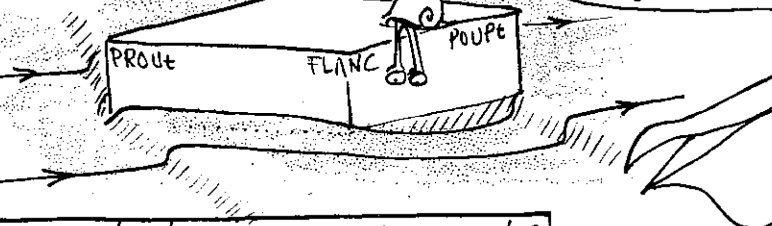
Au niveau de la PROUE l'eau est brusquement ralentie et elle monte au-dessus de la LIGNE DE FLOTTAISON. Au passage du second dièdre, cette eau est réaccélérée, et même SURACCÉLÉRÉE, c'est-à-dire portée à une vitesse SUPÉRIEURE à celle de l'écoulement "libre", général. En même temps, le niveau baisse au-dessous de la ligne de flottaison. À la hauteur de la POUPE, vitesse et niveau sont brutalement réajustés pour retrouver leurs valeurs amont.

LA VAGUE D'ÉTRAVE

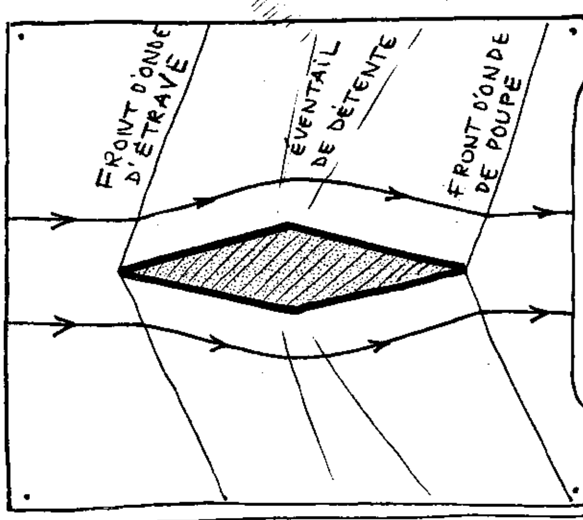
Dans ce régime où la vitesse **V** est supérieure à la vitesse **Vs** des ondes de surface, on trouve des **FRONTS D'ONDE**. L'étrave, par exemple, émet des ondes de surface qui, ne pouvant pas remonter vers l'amont, s'entassent les unes sur les autres en formant un bourrelet liquide, la **VAGUE D'ÉTRAVE**.



Non, il n'y a pas de "fronts de détente", de fronts de raréfaction. Cela se fait apparemment en douceur



Pour une fois que j'essaie d'intuiter quelque chose, je me plante



Et oui, Léon, les variations de vitesse et de niveau s'effectuent à l'étrave et à la poupe de façon brutale, à travers des FRONTS D'ONDE. En revanche, sur le flanc, la vitesse et le niveau varient continûment, à travers un **ÉVENTAIL DE DÉTENTE**.

L'observation, Léon, l'observation !





Tirésias a raison.
FLOTCH
FLOTCH
Pas facile de voir ce qui se passe sous les ailes...
Ah, voilà, c'est très net!
ATTENTION! la berge!..
Encore une victime de la Science!
Dans une coque de navire, les flancs peuvent être assimilés à une succession d'un grand nombre de facettes.
AMONT
AVAL
Et la VAGUE DE POUPE assure un raccord avec le fluide AVAL, ce qui explique pourquoi les navires ne laissent pas derrière eux de sillon.
De même, la différence de vitesse résiduelle, due à l'entraînement de l'eau par la coque, par frottement, est annulée par la turbulence du SILLAGE
Eh bien, moi, j'ai trouvé le principe fondamental de la MÉCANIQUE DES FLUIDES!
Ah, Tirésias, vous m'étonnerez toujours. Et c'est QUOI?
ON EST PRIÉ DE LAISSER LE FLUIDE DANS L'ÉTAT OÙ ON L'A TROUVÉ EN ENTRANT.

MESURE DE ViTESSES

Pour comprendre tout ce qui se passe, ce qu'il faudrait c'est un moyen de mesurer la vitesse.



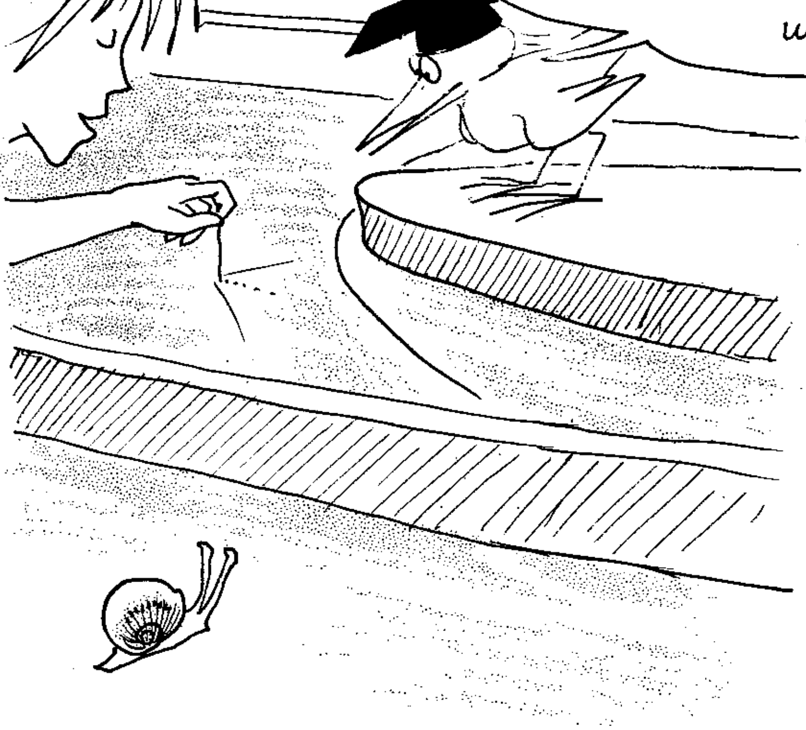
Si on place une fine aiguille dans un écoulement dont la vitesse **V** est supérieure à la vitesse **Vs** des ondes de surface, plus la vitesse sera grande, plus les fronts d'onde seront couchés sur la trajectoire.

V>Vs

V>Vs

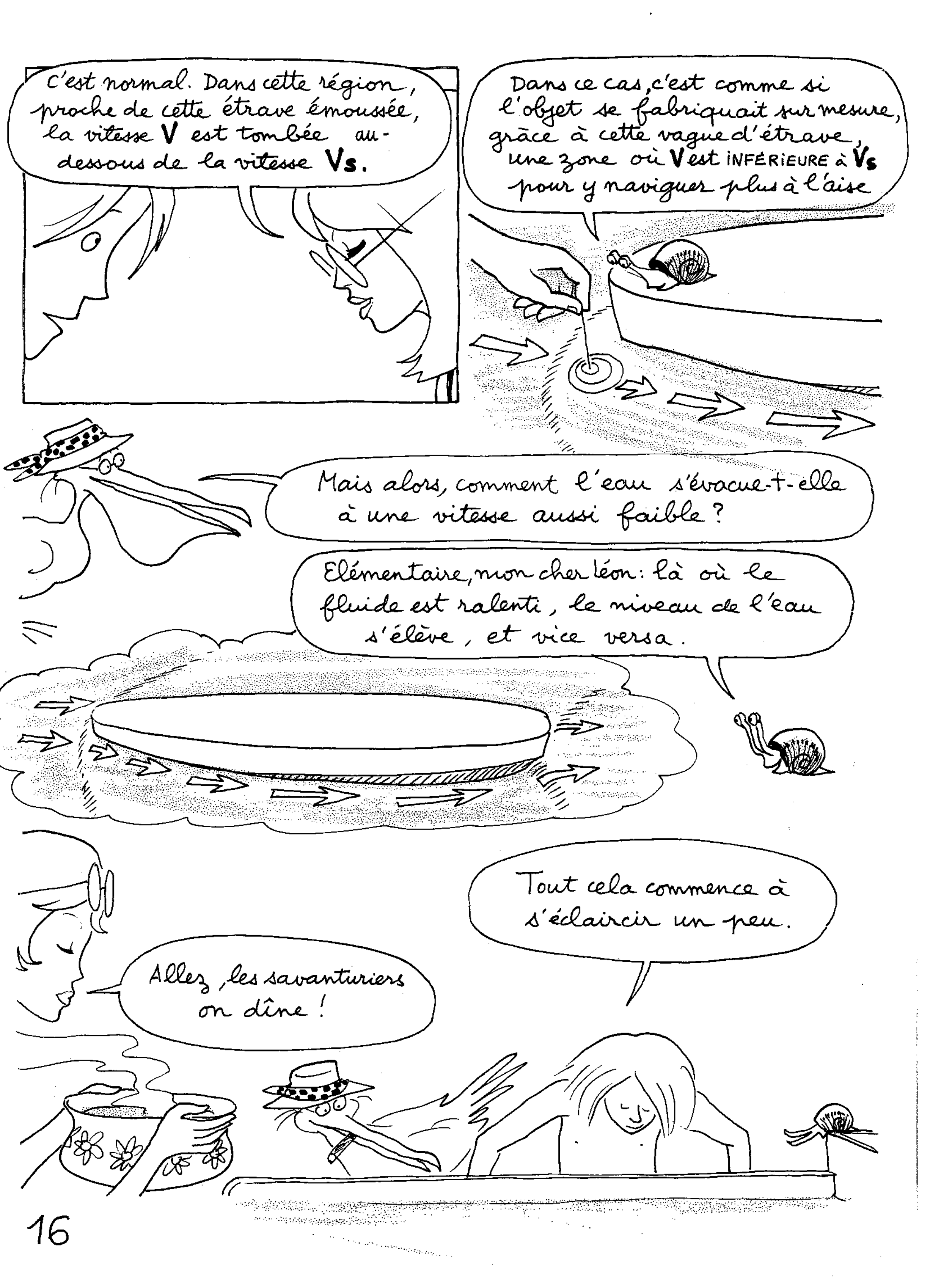
Ma foi, Max, tu as raison. Cela peut permettre de mesurer la vitesse **V** (*)

Tu as vu, lorsque l'avant de l'objet est émoussé, le front d'onde s'établit un peu en avant, en formant une **ONDE DÉTACHÉE**

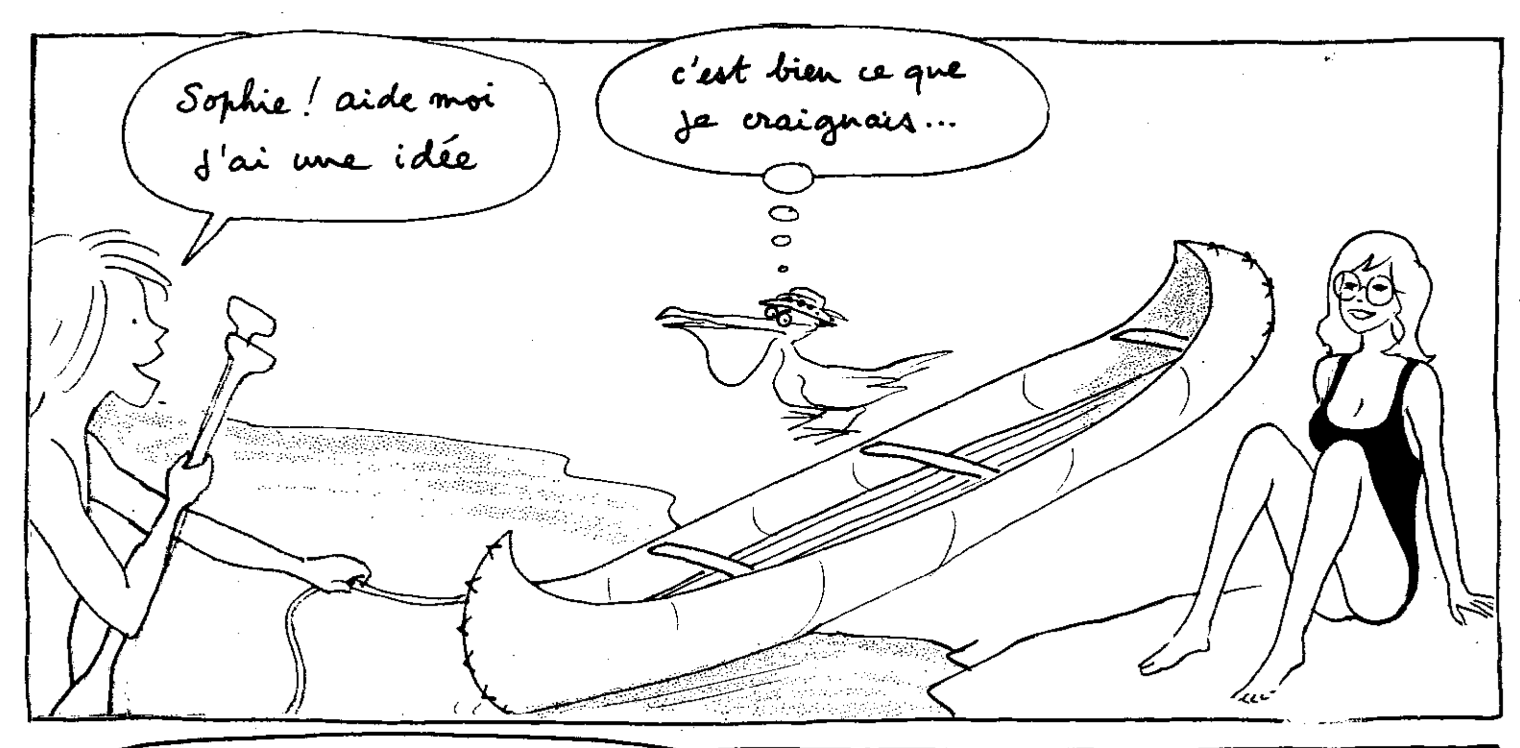


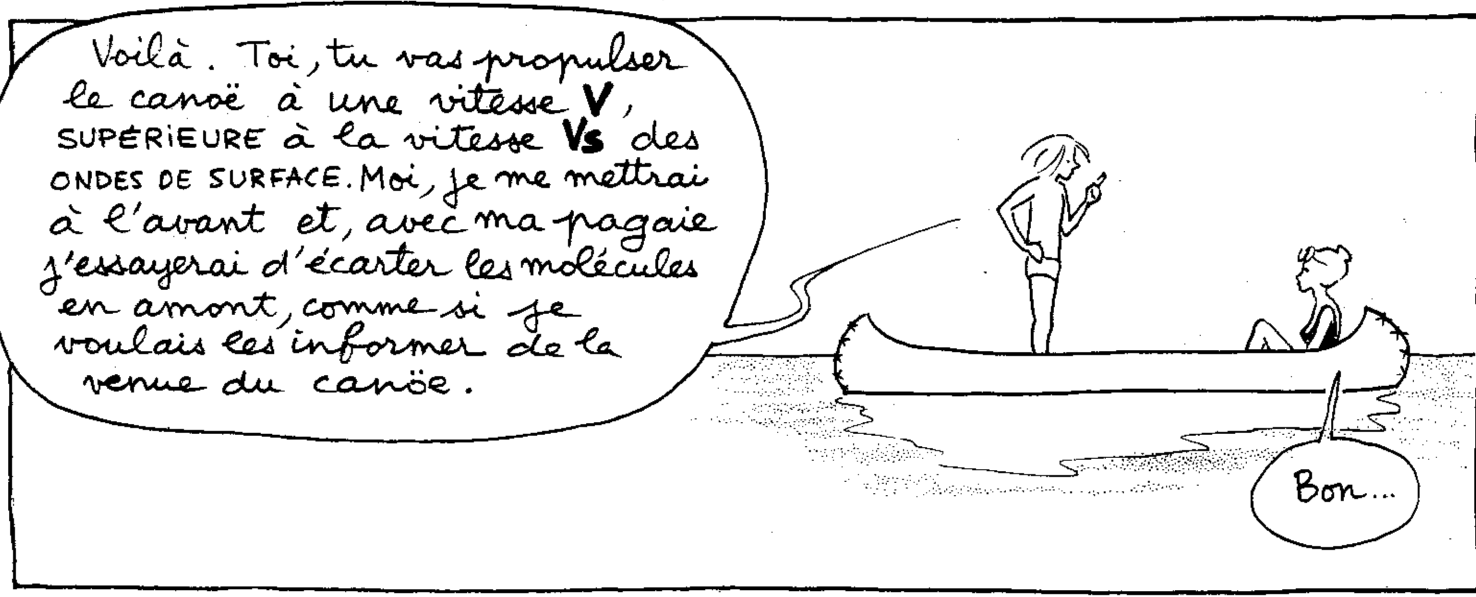


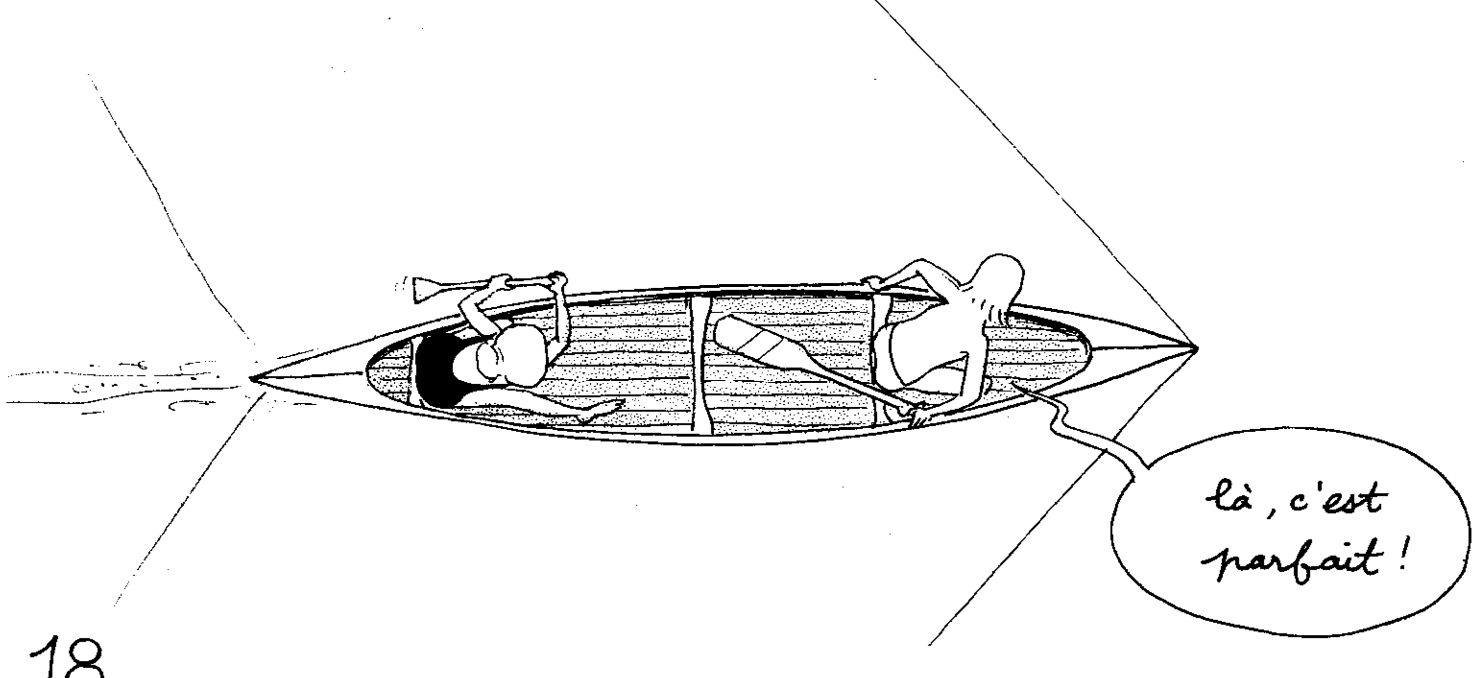
(*) Voir Annexe **A**


C'est normal. Dans cette région, proche de cette étrave émoussée, la vitesse V est tombée au-dessous de la vitesse Vs.
Dans ce cas, c'est comme si l'objet se fabriquait sur mesure, grâce à cette vague d'étrave, une zone où V est INFÉRIEURE à Vs pour y naviguer plus à l'aise
Mais alors, comment l'eau s'évacue-t-elle à une vitesse aussi faible ?
Elémentaire, mon cher Léon : là où le fluide est ralenti, le niveau de l'eau s'élève, et vice versa.
Tout cela commence à s'éclaircir un peu.
Allez, les savanturiers on dîne !


Ça serait quand même pas mal si on arrivait à supprimer ces ondes
Elles consomment de l'énergie, ça c'est sûr !
quelque chose se trame mais QUOi ?
Oui, il y a de l'énergie là-dedans. La preuve est que le voisin, avec son bateau, arrive à démolir notre appontement.
Tant qu'on arrive à "prévenir" le fluide en amont, l'onde ne se forme pas...
Donc, même lorsqu'on va plus vite que les ONDES DE SURFACE, il faut pouvoir continuer d'agir sur le fluide en amont.
HEP!
vaisselle...
Il doit y avoir une solution.
AH!..
SNAP!

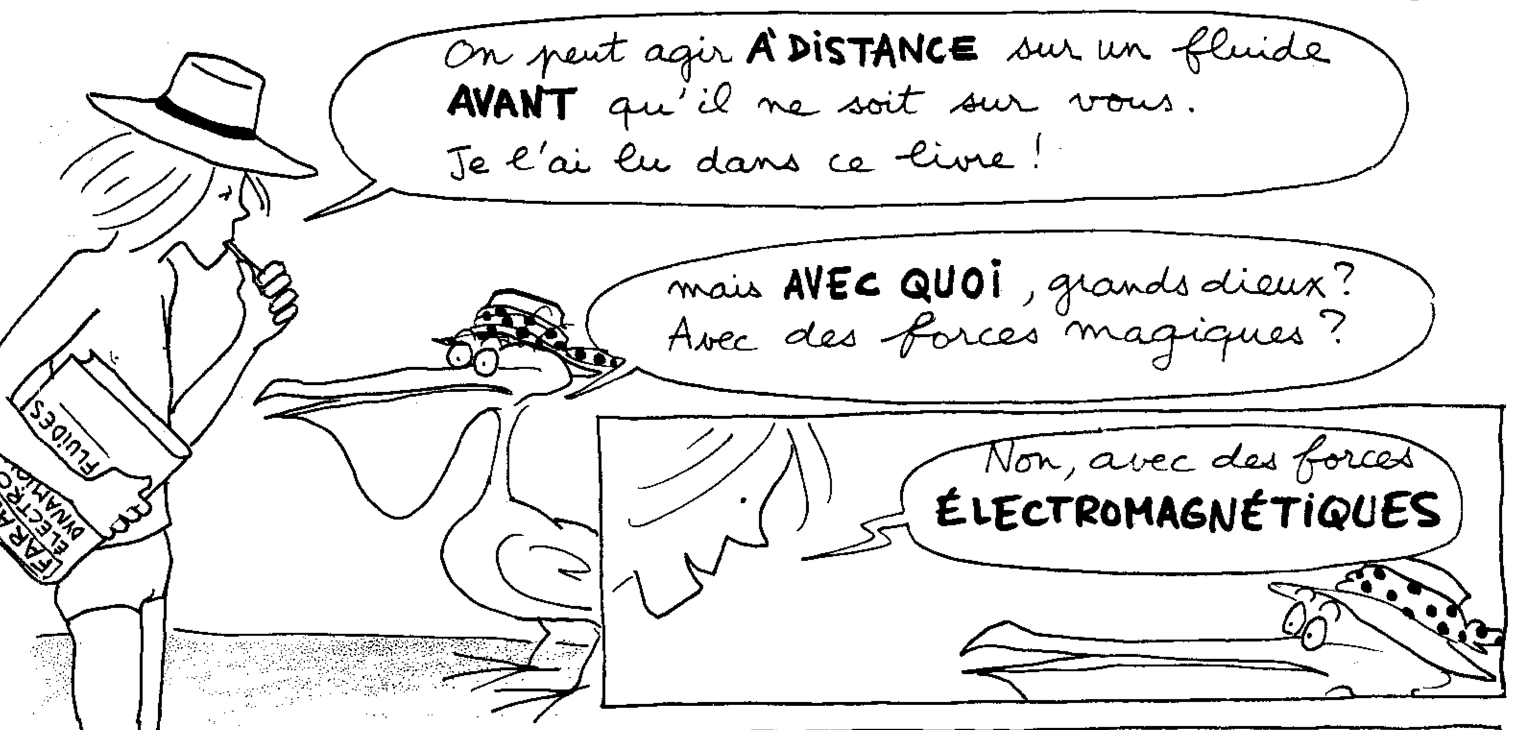

Sophie ! aide moi j'ai une idée
c'est bien ce que je craignais...


Voilà. Toi, tu vas propulser le canoë à une vitesse V, SUPÉRIEURE à la vitesse Vs des ONDES DE SURFACE. Moi, je me mettrai à l'avant et, avec ma pagaie j'essayerai d'écarter les molécules en amont, comme si je voulais les informer de la venue du canöe.
Bon...


là, c'est parfait !


On va voir ce qu'on va voir
j'appréhende
Hé!
c'est pas ça ...
qu'est-ce que vous fabriquez?
Rien. Anselme essayait d'informer des molécules
Là, je ne comprends plus ce que tu espères. Si tu veux "informer" le fluide, comme tu le dis, il va falloir que tu projettes, et que tu déplaces sur l'amont de nouveaux OBJETS MATÉRIELS qui, eux-mêmes, engendreront des vagues. C'est un cercle vicieux.
attendez ... attendez ...
Sophie dit que cela ne fait que repousser le problème.
FARADAY
Elle dit que naviguer sans faire de vague d'étrave est une impossibilité.

OÙ ANSELME DÉCOUVRE LA MAGNÉTOHYDRODYNAMIQUE



Si, dans un fluide on crée, d'une part, un CHAMP MAGNÉTIQUE $\vec{B}$, d'autre part un COURANT ÉLECTRIQUE $\vec{I}$ qui lui est PERPENDICULAIRE, alors le fluide subit une **FORCE DE LAPLACE** d'intensité **IB** et dont la direction est donnée par la

RÈGLE DES TROIS DOIGTS :

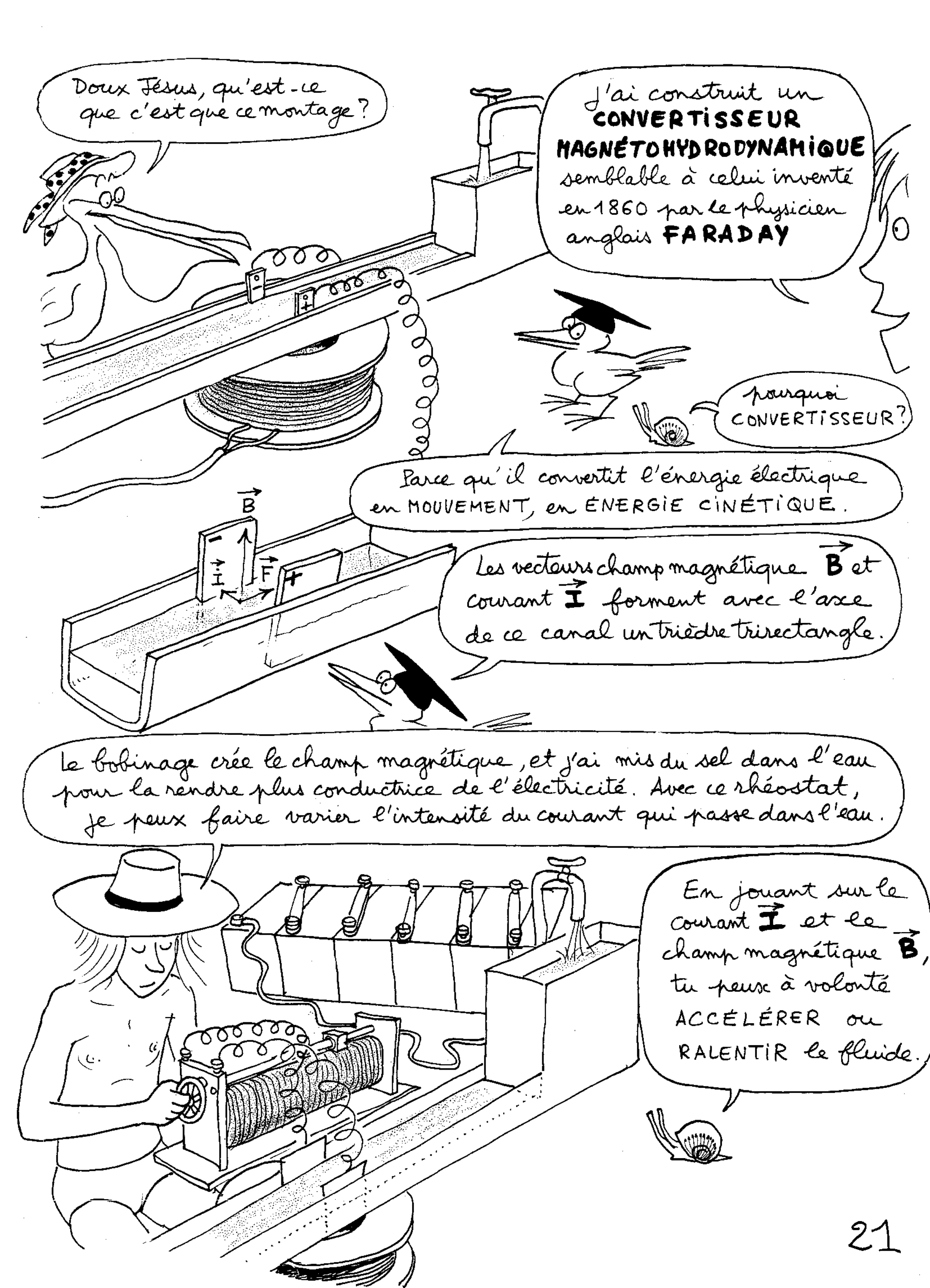
Si on forme un trièdre avec le pouce, l'index et le médius ; si l'intensité $\vec{I}$ du courant qui traverse le matériau est dirigée suivant l'index, le champ magnétique $\vec{B}$ suivant le médius, alors une force apparaîtra dans la direction donnée par le pouce

B
I
F

$\vec{I}$
$\vec{B}$
$\vec{F}$

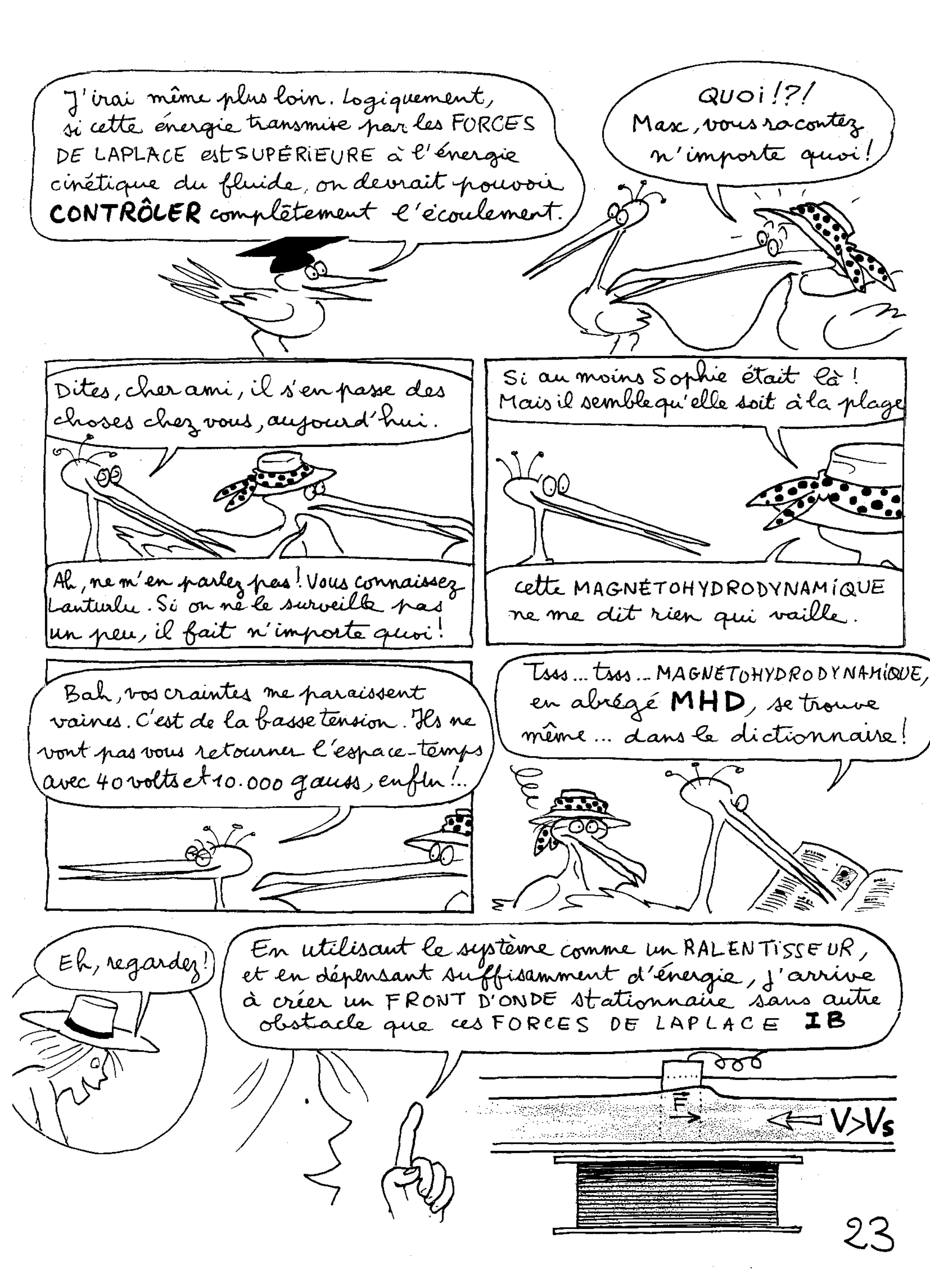
la force "pouce"

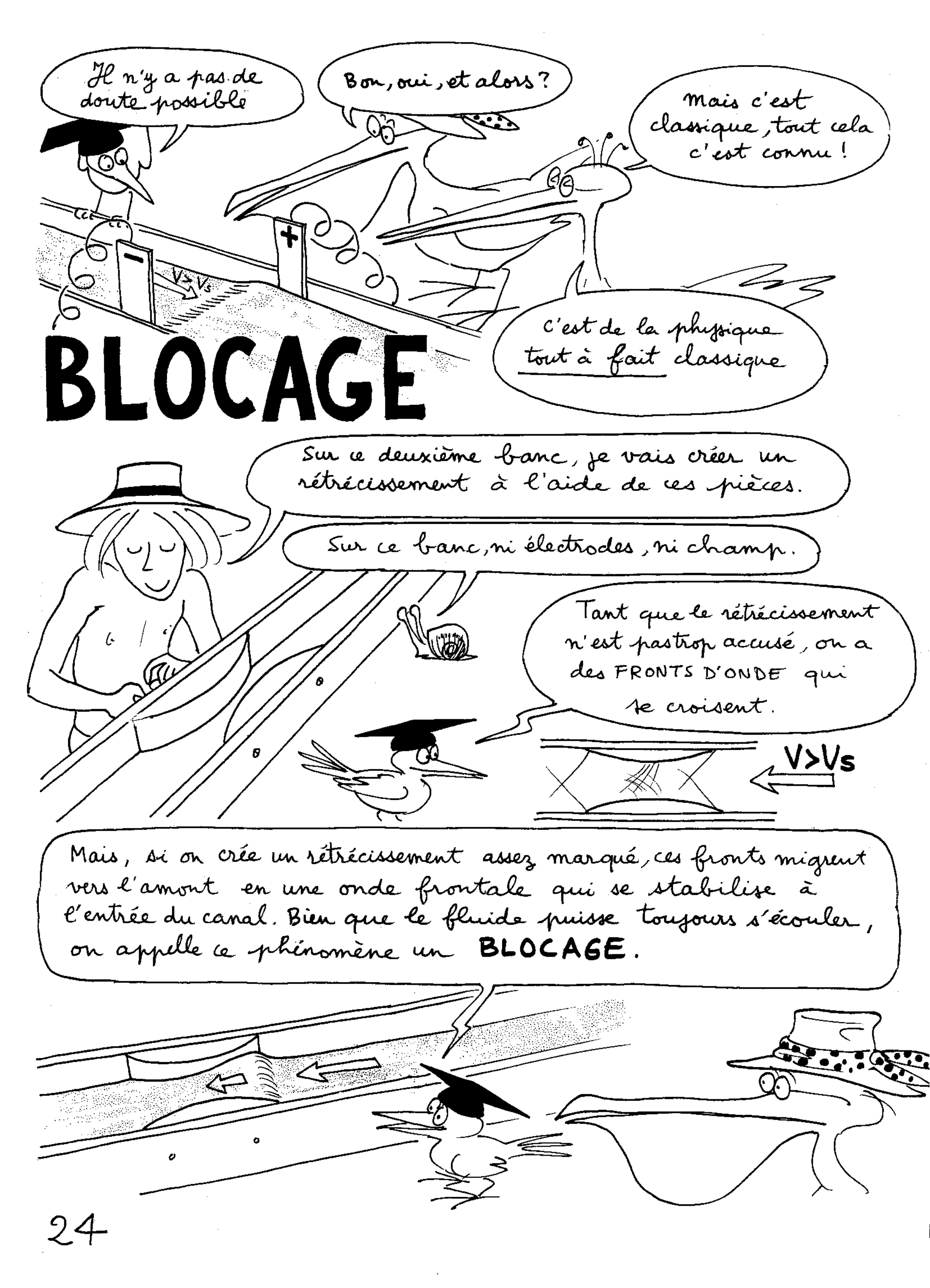
La Direction



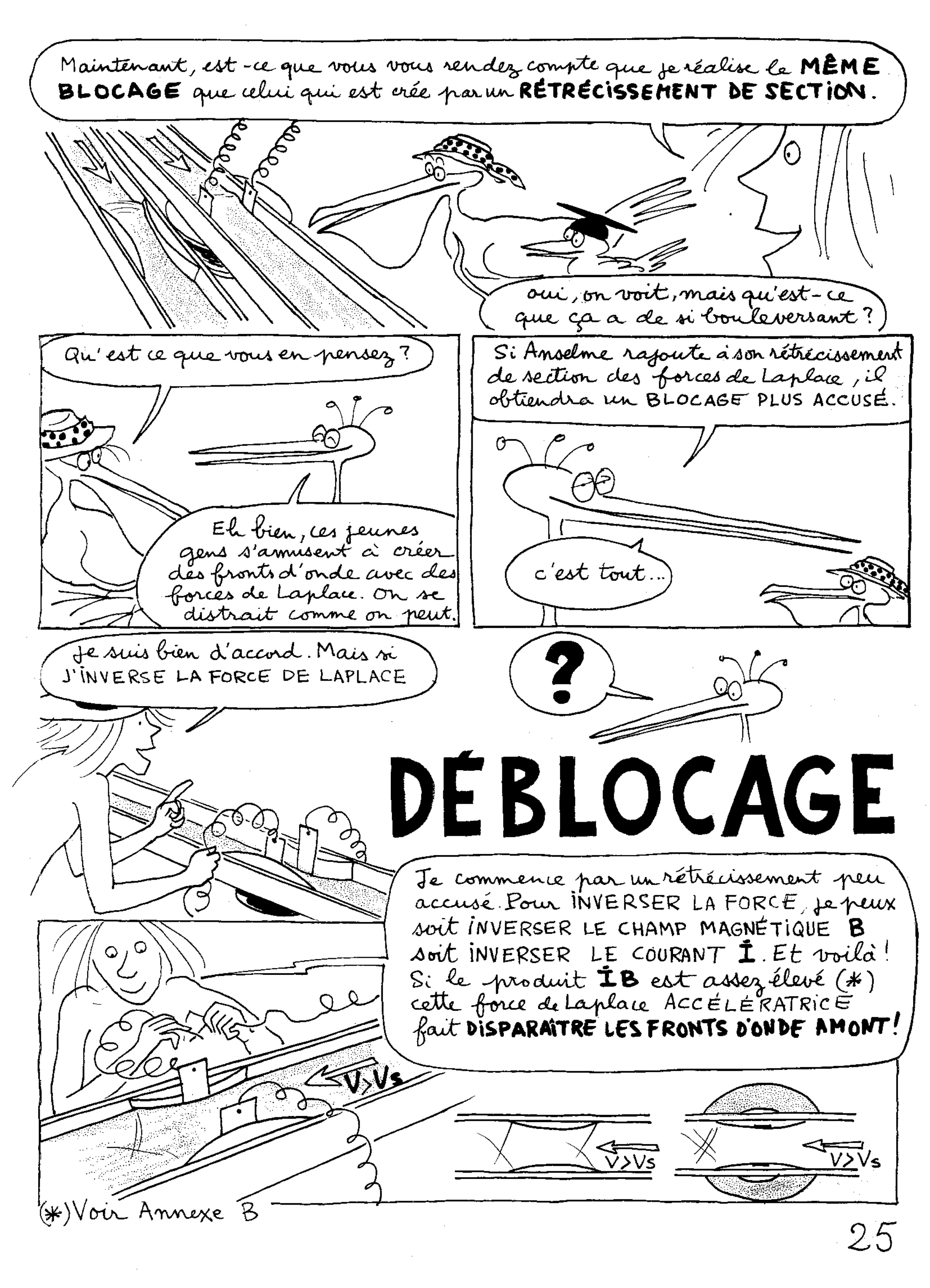
Doux Jésus, qu'est-ce que c'est que ce montage?
J'ai construit un CONVERTISSEUR MAGNÉTOHYDRODYNAMIQUE semblable à celui inventé en 1860 par le physicien anglais FARADAY
pourquoi CONVERTISSEUR?
Parce qu'il convertit l'énergie électrique en MOUVEMENT, en ÉNERGIE CINÉTIQUE.
B
I
F
Les vecteurs champ magnétique B et courant I forment avec l'axe de ce canal un trièdre trirectangle.
Le bobinage crée le champ magnétique, et j'ai mis du sel dans l'eau pour la rendre plus conductrice de l'électricité. Avec ce rhéostat, je peux faire varier l'intensité du courant qui passe dans l'eau.
En jouant sur le courant I et le champ magnétique B, tu peux à volonté ACCÉLÉRER ou RALENTIR le fluide.


CRITÈRE D'INTERACTION
Il me semble que cette histoire part un peu dans tous les sens
Au début il était question de fluides et d'écoulements
Et maintenant, on mélange tout !
n'importe quoi !..
qu'est-ce qu'ils fabriquent aujourd'hui ?
moi, je ne compends plus
je cherche à changer les données habituelles de la mécanique des fluides en introduisant des paramètres supplémentaires : des FORCES qui agissent DANS LA MASSE DU FLUIDE ET À DISTANCE
je sens qu'on ne va pas s'ennuyer
Mais, qui te dit que ces forces auront une action suffisante ?
Anselme tient la forme, aujourd'hui
Il me semble que c'est une question d'ÉNERGIE
qu'est-ce que tu entends par là ?
Le fluide a une certaine ÉNERGIE CINÉTIQUE. Pour modifier la vitesse du fluide avec des forces de Laplace, il faudra dépenser une énergie du même ordre de grandeur

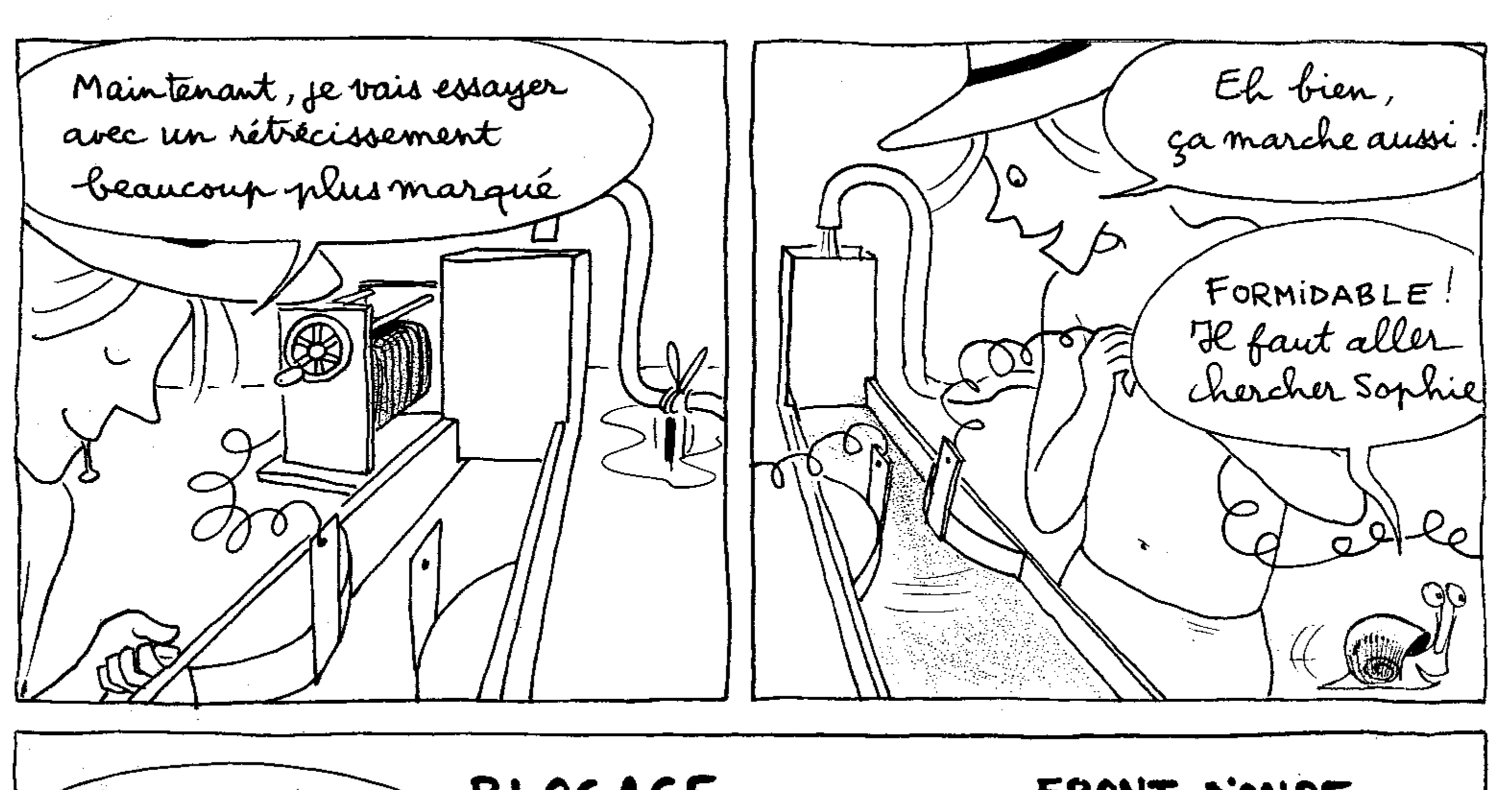

J'irai même plus loin. Logiquement, si cette énergie transmise par les FORCES DE LAPLACE est SUPÉRIEURE à l'énergie cinétique du fluide, on devrait pouvoir CONTRÔLER complètement l'écoulement.
QUOI !?! Max, vous racontez n'importe quoi !
Dites, cher ami, il s'en passe des choses chez vous, aujourd'hui.
Ah, ne m'en parlez pas ! Vous connaissez Lanturlu. Si on ne le surveille pas un peu, il fait n'importe quoi !
Si au moins Sophie était là ! Mais il semble qu'elle soit à la plage
cette MAGNÉTOHYDRODYNAMIQUE ne me dit rien qui vaille.
Bah, vos craintes me paraissent vaines. C'est de la basse tension. Ils ne vont pas vous retourner l'espace-temps avec 40 volts et 10.000 gauss, enfin !..
Tsss... tsss... MAGNÉTOHYDRODYNAMIQUE, en abrégé MHD, se trouve même... dans le dictionnaire !
Eh, regardez !
En utilisant le système comme un RALENTISSEUR, et en dépensant suffisamment d'énergie, j'arrive à créer un FRONT D'ONDE stationnaire sans autre obstacle que ces FORCES DE LAPLACE IB
F
V>Vs

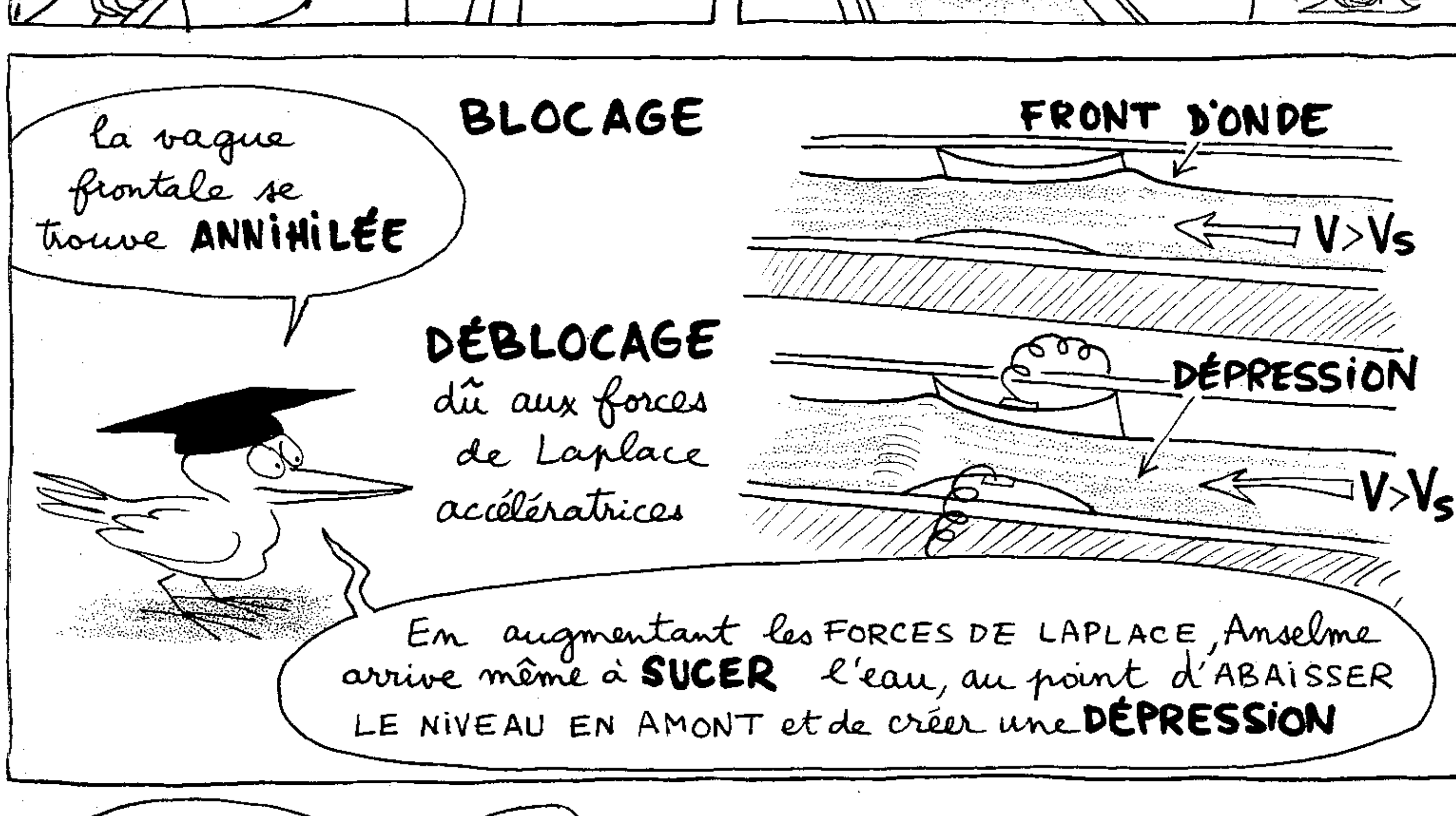


Il n'y a pas de doute possible
Bon, oui, et alors?
Mais c'est classique, tout cela c'est connu!
V>Vs
C'est de la physique tout à fait classique
BLOCAGE
Sur ce deuxième banc, je vais créer un rétrécissement à l'aide de ces pièces.
Sur ce banc, ni électrodes, ni champ.
Tant que le rétrécissement n'est pas trop accusé, on a des FRONTS D'ONDE qui se croisent.
V>Vs
Mais, si on crée un rétrécissement assez marqué, ces fronts migrent vers l'amont en une onde frontale qui se stabilise à l'entrée du canal. Bien que le fluide puisse toujours s'écouler, on appelle ce phénomène un BLOCAGE.



(*) Voir Annexe B


Maintenant, je vais essayer avec un rétrécissement beaucoup plus marqué
Eh bien, ça marche aussi !
FORMIDABLE ! Il faut aller chercher Sophie


BLOCAGE
FRONT D'ONDE
la vague frontale se trouve ANNIHILÉE
V>Vs
DÉBLOCAGE
dû aux forces de Laplace accélératrices
DÉPRESSION
V>Vs
En augmentant les FORCES DE LAPLACE, Anselme arrive même à SUCER l'eau, au point d'ABAISSER LE NIVEAU EN AMONT et de créer une DÉPRESSION


SOPHIE ! Anselme a trouvé un truc pas possible !
Tirésias ! tu es tout essoufflé. Tu as couru ?





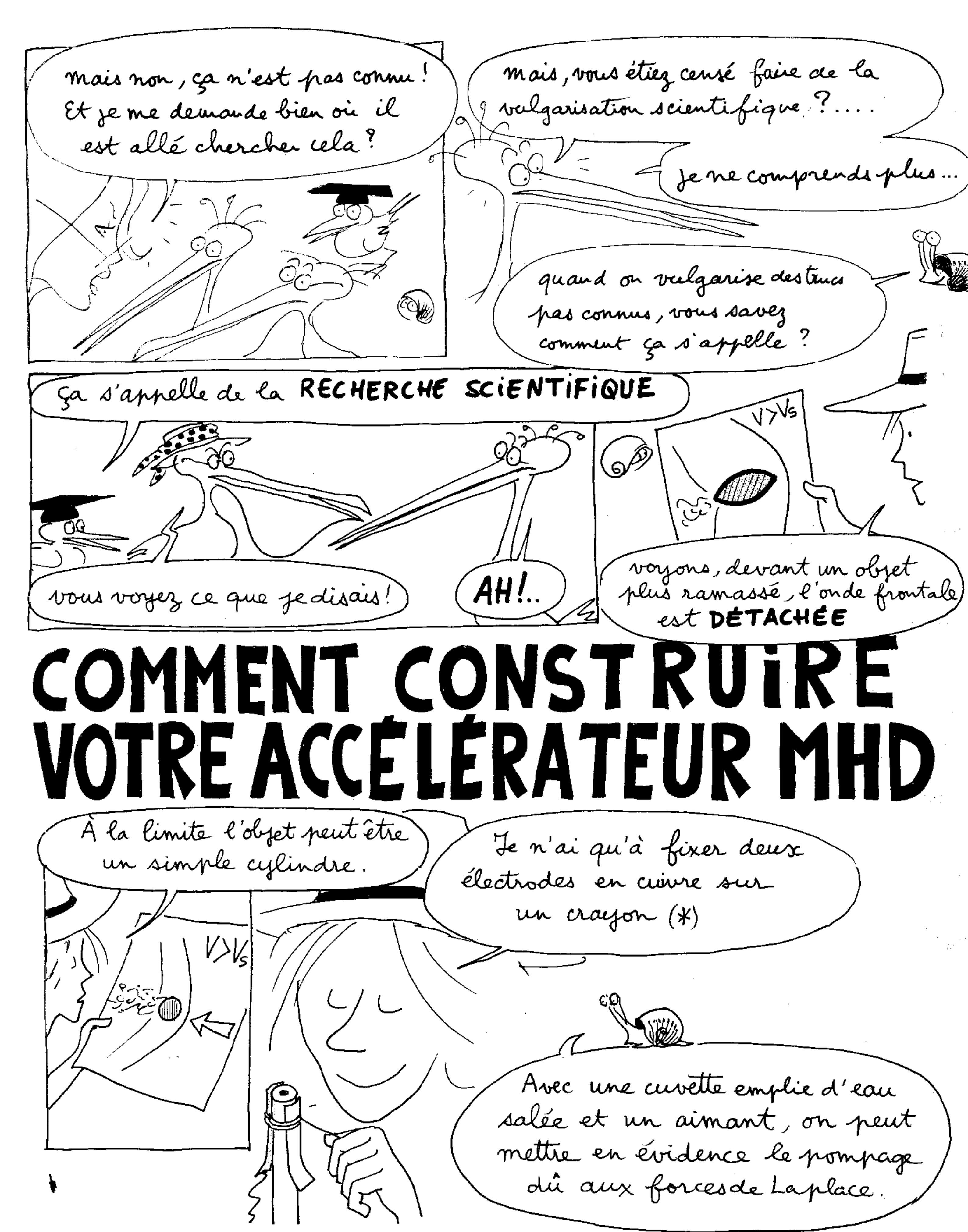
ANNIHILATION DE LA VAGUE D'ÉTRAVE







En appliquant la RÈGLE DES TROIS DOIGTS, voici le CHAMP DE FORCE auquel le fluide va être soumis.
Nom d'un vecteur !
Par tous les diables de la physique Anselme a annihilé la
VAGUE D'ÉTRAVE !
QUOI ?
V>Vs
qu'est-ce qu'il me fabrique, celui-là ?..
je vous ferai remarquer que, s'il supprime la vague d'étrave, par contre, la vague de poupe subsiste ...
mais, c'est connu ça, non ?



(*) Montage imaginé en 1976 par Maurice VITON.



Encre
Aimant
L'aimant, sous cette cuvette, crée un champ magnétique B vertical. On peut visualiser le POMPAGE avec de l'encre
CHAMP DE FORCE
ÉCOULEMENT
avec un petit aimant permanent et une pile de poche, on peut mettre en évidence le pompage.
Mais pour agir suffisamment sur le fluide au point de modifier la structure des fronts d'onde, il faut des forces de Laplace dix fois plus intenses.
V>Vs
Je mets cette maquette dans mon canal d'essai, et j'augmente la force. Primo le sillage est non turbulent ; l'onde frontale se déforme.
J'augmente encore. L'onde frontale disparaît, remplacée par une dépression de la surface liquide.
Bon, passons aux applications !
Anselme attends-moi !
Alors, qu'en penses-tu ?
Les Forces de Laplace AGISSENT À DISTANCE
Il semble qu'Anselme ait trouvé comment "INFORMER" le fluide en amont.

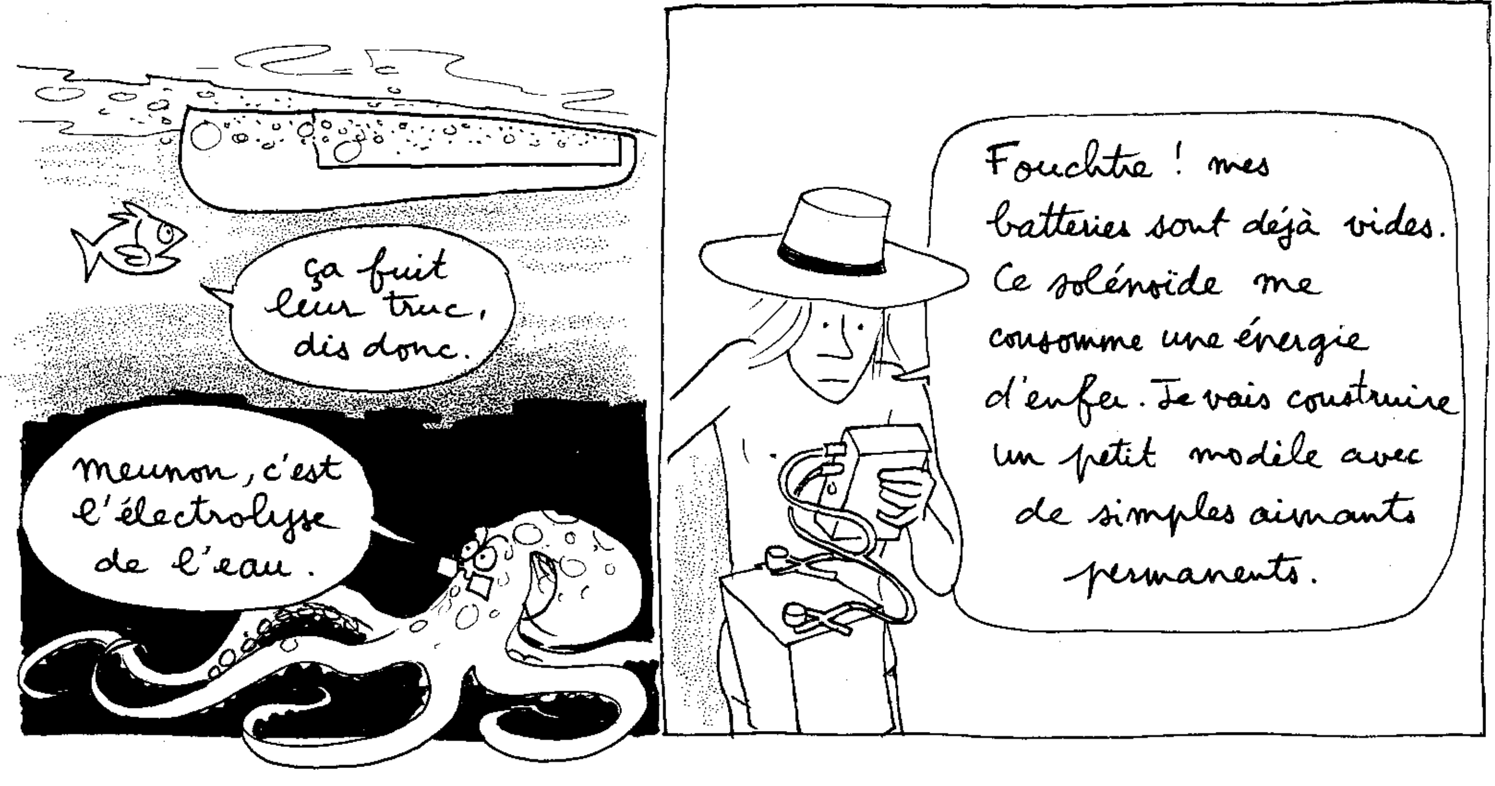

Ca y est ! Anselme est déjà en train d'équiper le canöe
quand il est lancé celui-là...
où vas-tu trouver le champ magnétique ?
Sapristi, j'avais oublié cet aspect de la chose.
Je vais mettre le solénoïde à l'intérieur
Mais alors ? ton champ B ?
ÉLECTRODES
En utilisant le retour des lignes de force, j'arrive très bien à créer le champ magnétique $\vec{B}$ vertical

LA PROPULSiON MHD

Bon, j'ai mis en marche mon annihilateur de vague d'étrave. Il ne me reste plus qu'à pagayer pour amener mon canöe à une vitesse **V** supérieure à la vitesse **Vs** des ondes de surface.

Ma parole ! mais mon canöe avance tout seul !

C'est normal : le système **MHD** pompe l'eau vers l'arrière, ce qui modifie la répartition des pressions sur la coque. Il en résulte une **POUSSÉE**.



LE RENDEMENT MHD



(*) Voir Annexe **C**



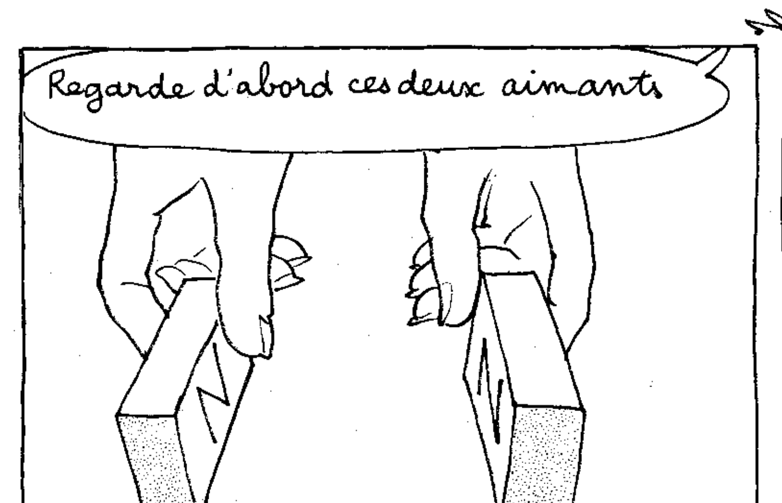
(*) Voir Annexe C

(**) La GYMNOTE est un capable d'infliger des décharges de 300 volts

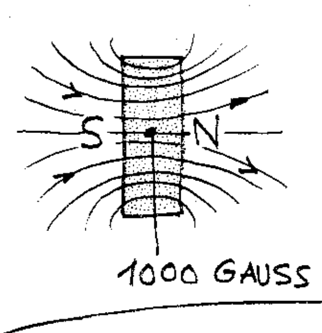
L'ACCÉLÉRATEUR PARIÉTAL

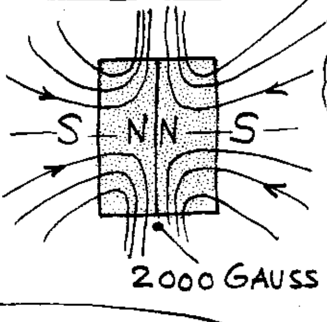
Sophie, j'ai trouvé comment opérer en basse tension

misère...



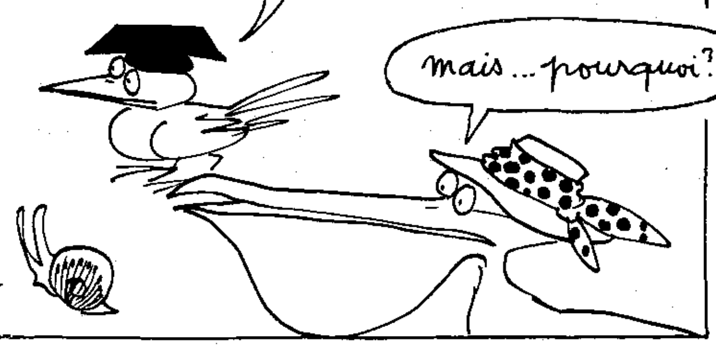
Je les colle "nez à nez" en opposant leurs champs, à l'aide de colle super-rapide.

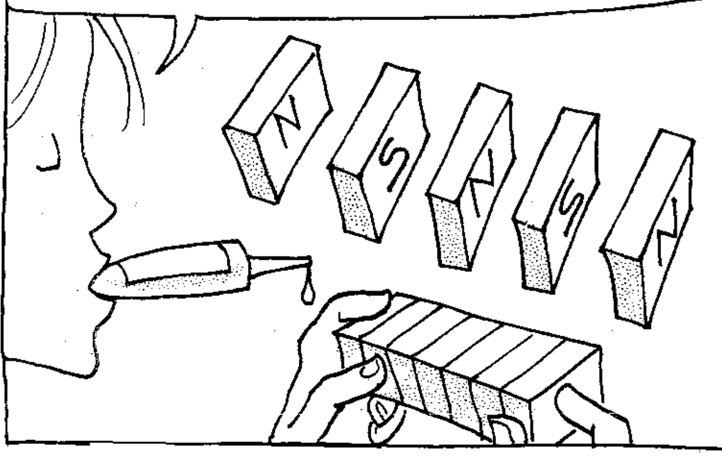


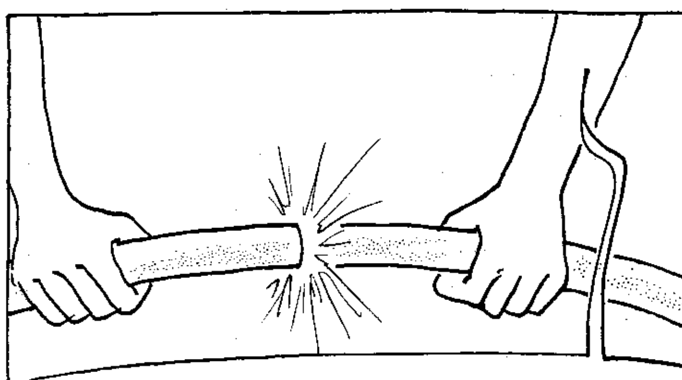


Un barreau aimanté est comme une sorte de tube qui crache son champ magnétique.

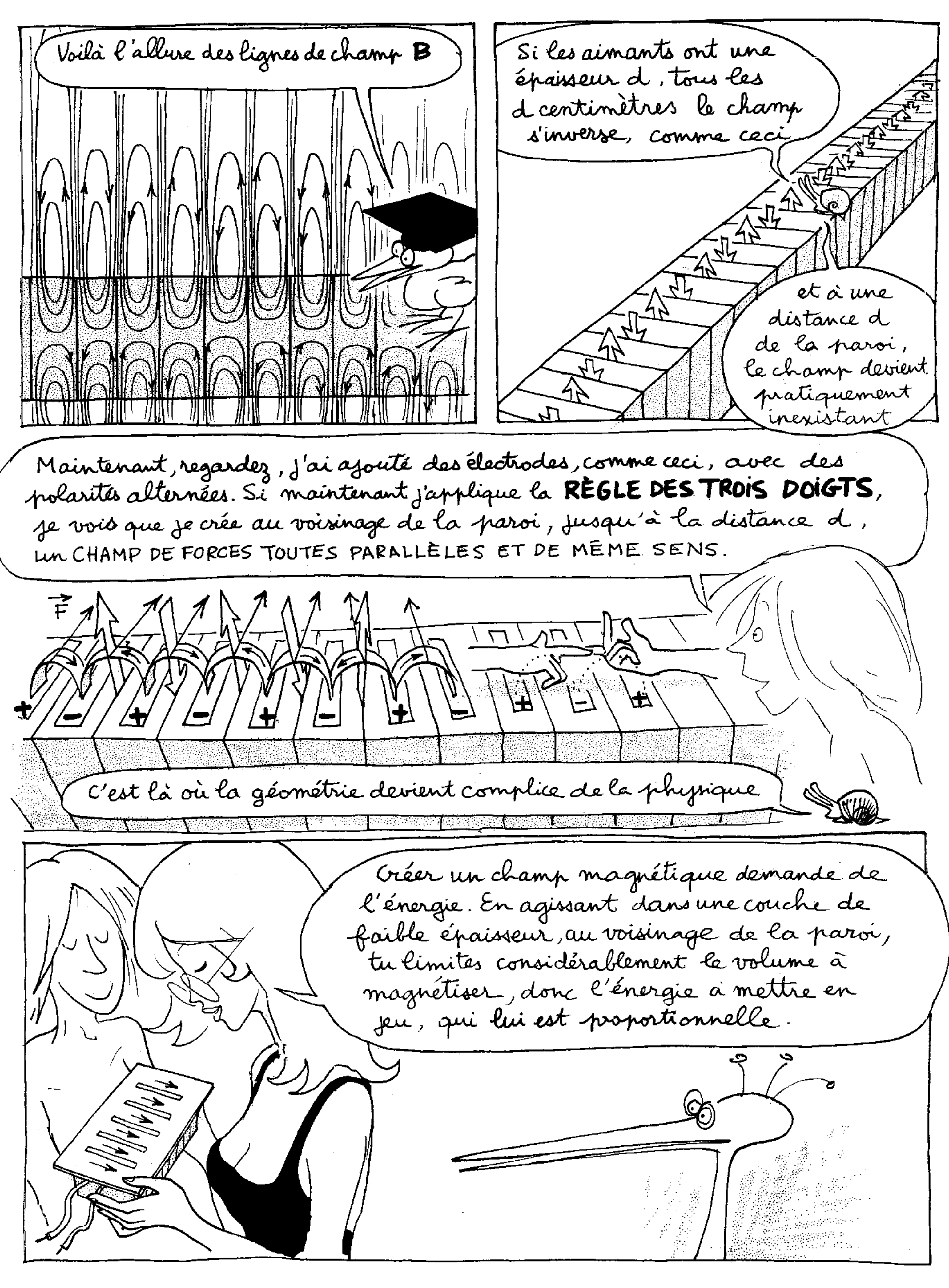
Oui, c'est amusant. Concentré dans le plan de jonction, le champ y est pratiquement doublé







Si on met deux tuyaux face à face en maintenant le débit, l'eau jaillit violemment dans la zone de cisaillement.


Voilà l'allure des lignes de champ B
Si les aimants ont une épaisseur d, tous les d centimètres le champ s'inverse, comme ceci
et à une distance d de la paroi, le champ devient pratiquement inexistant
Maintenant, regardez, j'ai ajouté des électrodes, comme ceci, avec des polarités alternées. Si maintenant j'applique la RÈGLE DES TROIS DOIGTS, je vois que je crée au voisinage de la paroi, jusqu'à la distance d, un CHAMP DE FORCES TOUTES PARALLÈLES ET DE MÊME SENS.
F
+
-
+
-
+
-
+
-
+
-
+
C'est là où la géométrie devient complice de la physique
Créer un champ magnétique demande de l'énergie. En agissant dans une couche de faible épaisseur, au voisinage de la paroi, tu limites considérablement le volume à magnétiser, donc l'énergie à mettre en jeu, qui lui est proportionnelle.

je peux aussi remplacer les aimants par des bobinages

$\vec{F}$

$\vec{B}$

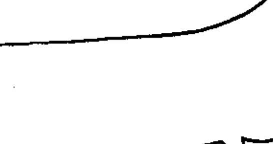
Voici un système plus simple, à deux électrodes

UNE NOUVELLE MÉCANIQUE DES FLUIDES

Dès qu'on incite un fluide à faire quelque chose qui lui déplaît, il réagit. Par exemple, quand il s'agit d'un contournement un peu trop abrupt, il "décolle".

Et si tu déplaces un objet un peu trop vite dans ce fluide, de telle manière qu'il ne puisse plus "prendre ses dispositions" pour l'accueillir, des FRONTS D'ONDE apparaissent.

Et il en a été ainsi tant qu'on a laissé le fluide en faire à sa guise. Mais **LA MHD CHANGE RADICALEMENT TOUTES LES DONNÉES DU PROBLÈME.**




90°
Tenez, par exemple : en mécanique des fluides classique, un angle trop fort provoque un DÉCOLLEMENT, générateur de TURBULENCE.
un petit coup de MHD et tout rentre dans l'ordre
Mais, enfin... c'est insensé ! c'est connu tout cela, non ?
À tous les coups l'on gagne !
Un vent de folie semble souffler sur cette histoire
Vous vous rappelez cette histoire de FRONT D'ONDE sur un dièdre ?
V>Vs
Crac ! disparu !


Vous voyez, il semble donc tout à fait possible de domestiquer un écoulement. Là où le fluide tend à ralentir, on le réaccélère, et là où il s'emballe, on le freine.
Rien là-dedans...
Gasp!..
NAVIER & STOCKES MÉCANIQUE DES FLUIDES
ONDES DE COMPRESSiON
ONDES DE DÉTENTE
Mais si, Léon, tu vas comprendre. Tu es d'accord que les changements de direction dans une paroi créent, lorsque V est supérieure à Vs soit une COMPRESSION, soit une RARÉFACTION. Maintenant, regarde : le système MAGNÉTOHYDRODYNAMIQUE CRÉE DES EFFETS ABSOLUMENT IDENTIQUES !
L'accélérateur MHD ou le divergent provoquent une baisse du niveau de l'eau dans le canal
V>Vs
FORCES DE LAPLACE
V>Vs
DIVERGENT

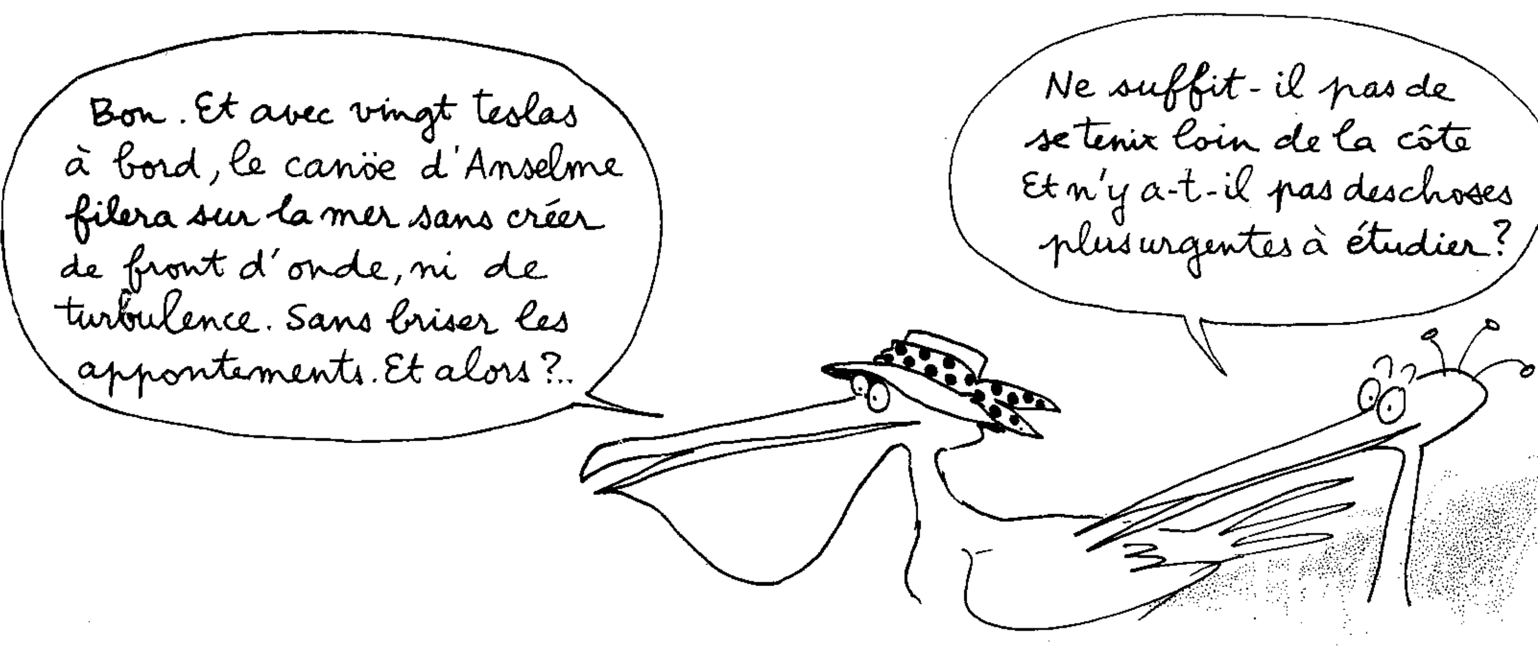


Le RALENTISSEUR MHD ou le CONVERGENT provoquent une REMONTÉE du niveau de l'eau dans le canal.
FORCE DE LAPLACE
V>Vs
V>Vs
CONVERGENT
FRONT D'ONDE
FRONT D'ONDE
Ainsi pourra-t-on faire s'annihiler mutuellement des phénomènes de compression et de raréfaction d'origine "naturelle", dus aux parois, et d'origine "artificielle", dus aux forces de Laplace.
Pour **RÉGULARISER** l'écoulement autour de la coque, il faut atténuer au maximum les variations de hauteur d'eau. Là où un FRONT D'ONDE aura tendance à se former, j'accélèrerai. Et, pour éviter une SURDÉTENTE une SURACCÉLÉRATION, en certains endroits, je ralentirai.
Ceci étant une application pure et simple de mon principe : **ON EST PRIÉ DE LAISSER LE FLUIDE DANS L'ÉTAT OÙ ON L'A TROUVÉ EN ENTRANT.**
Dans l'expérience de la page 28 j'arrivais fort bien à annihiler la vague d'étrave. Par contre la vague de poupe subsistait. Elle était même renforcée.
L'onde de poupe avait sa raison d'être précisément parce que tu avais trop abaissé le niveau de l'eau, en accélérant.

Tu as raison. le maître mot doit être de garder une hauteur d'eau constante, au niveau de la ligne de flottaison. Pour cela, je mets tout un jeu d'électrodes, soit accélératrices, soit retardatrices.

C'est l'application du principe de Tirésias.

Eh oui, si tu te débrouilles pour laisser le fluide dans l'état où tu l'as trouvé, pas besoin de vague de poupe.

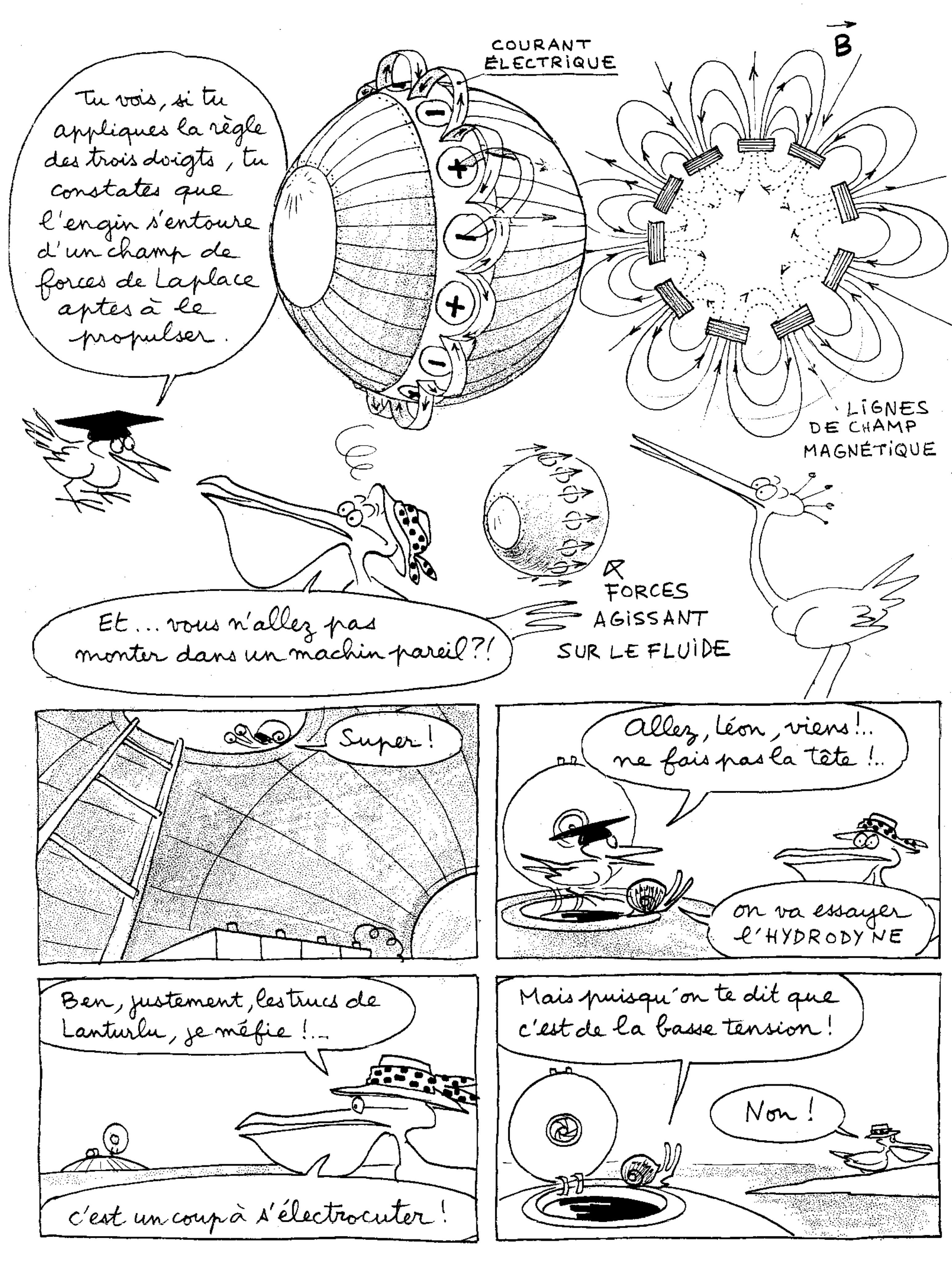


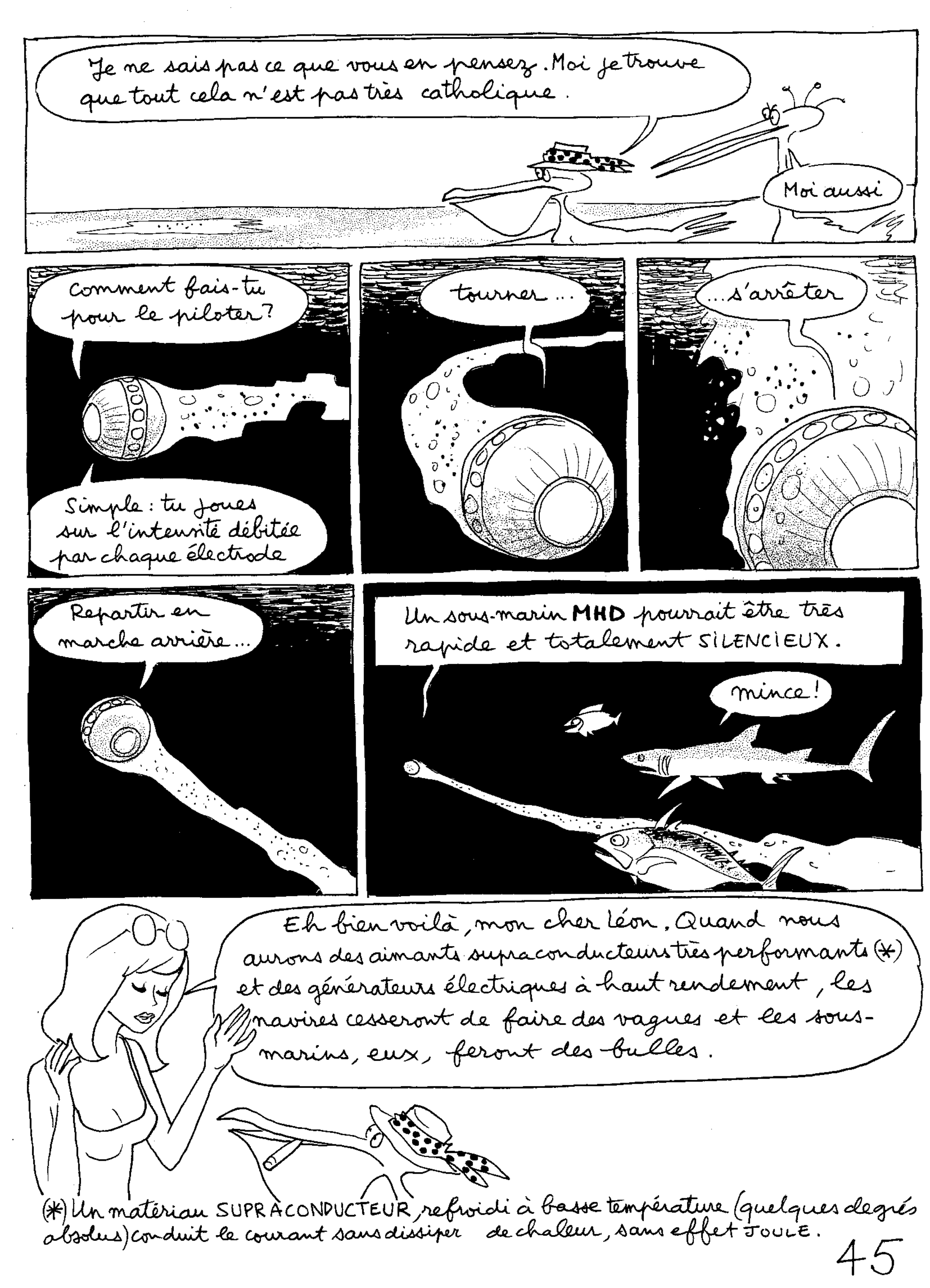
Je ne suis pas d'accord avec vous. Je trouve qu'on devrait étudier l'idée d'Anselme, et surtout l'ACCÉLÉRATEUR PARIÉTAL. Un navire a une **TRAÎNÉE DE FROTTEMENT** (force de résistance à l'avancement due au frottement de l'eau sur la coque). Mais la présence des FRONTS D'ONDE modifie la distribution de la PRESSION sur le profil, ce qui se traduit par une **TRAÎNÉE D'ONDE**, qui croît très rapidement avec la vitesse. Et c'est surtout cette dernière qui limite la vitesse des navires.



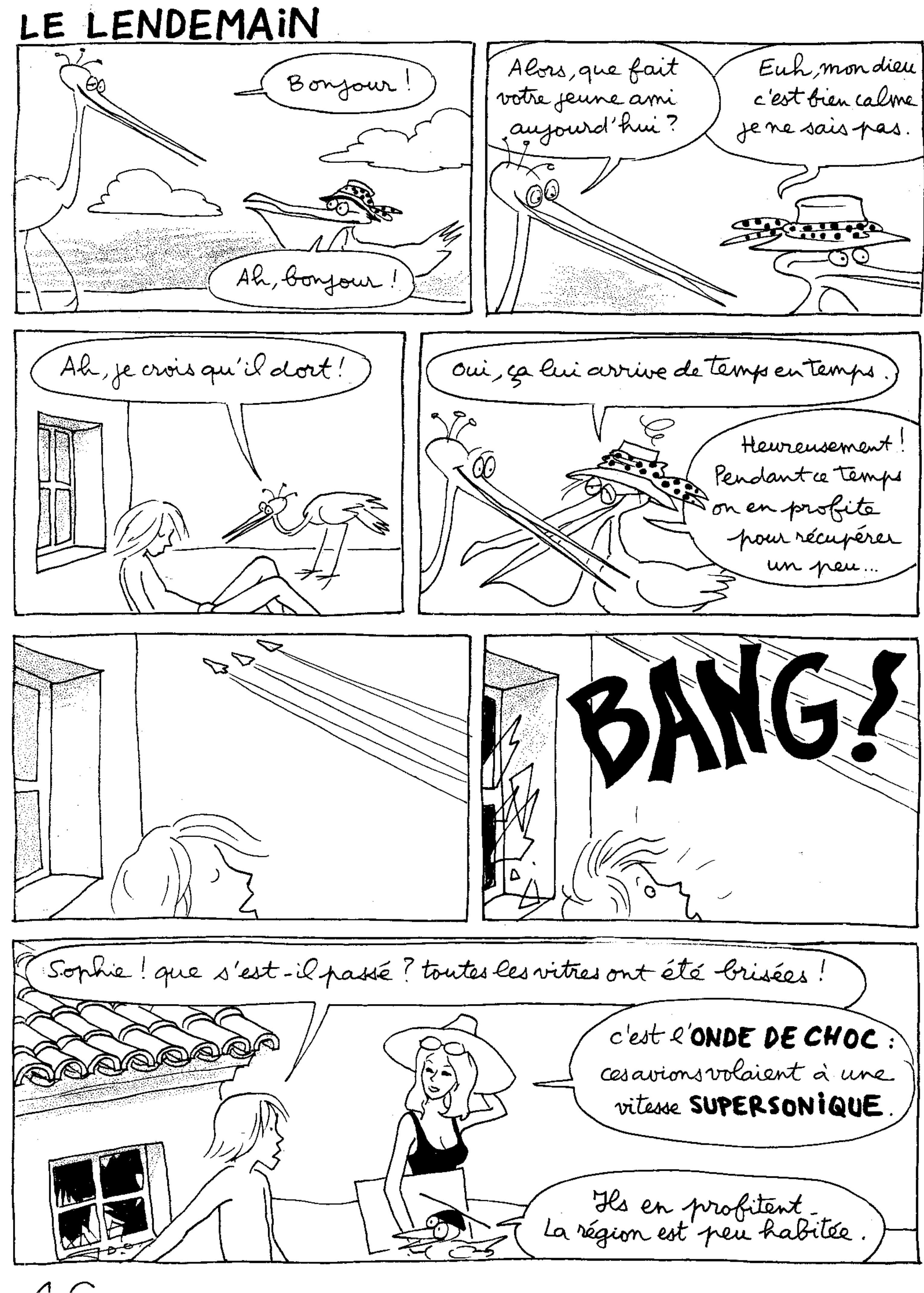
(*) Voir Annexe **B**


On a intérêt à avoir un champ magnétique B aussi élevé que possible. Si on travaille à B faible et I élevé, primo le rendement sera mauvais, secondo, du fait de l'électrolyse on aura un fort dégagement gazeux.
magnifique blocage !
réduisez, ça crâme !
Est-ce que tout ceci, Hum... cette propulsion électromagnétique n'est pas un peu en avance vis-à-vis de notre technologie du moment ?
LE SOUS-MARIN SANS HÉLICE
Non, il faut INNOVER, c'est tout !
J'ai l'impression que notre ami n'a pas l'intention d'en rester là
C'est un sous-marin
Dis, Anselme, ces trucs ronds, ce sont des hublots ?
Non, Tirésias, ce sont des électrodes. Et maintenant je vais installer les bobinages
Pourquoi est-ce que la coque est en bois ?
Il ne faut pas qu'elle conduise l'électricité
Ah, voilà le hublot !


Tu vois, si tu appliques la règle des trois doigts, tu constates que l'engin s'entoure d'un champ de forces de Laplace aptes à le propulser.
COURANT ÉLECTRIQUE
B
LIGNES DE CHAMP MAGNÉTIQUE
Et... vous n'allez pas monter dans un machin pareil ?!
FORCES AGISSANT SUR LE FLUIDE
Super !
Allez, Léon, viens !.. ne fais pas la tête !..
on va essayer l'HYDRODYNE
Ben, justement, les trucs de Lanturlu, je méfie !..
c'est un coup à s'électrocuter !
Mais puisqu'on te dit que c'est de la basse tension !
Non !



(*) Un matériau SUPRACONDUCTEUR, refroidi à basse température (quelques degrés absolus) conduit le courant sans dissiper de chaleur, sans effet JOULE.


LE LENDEMAIN
Bonjour !
Ah, bonjour !
Alors, que fait votre jeune ami aujourd'hui ?
Euh, mon dieu c'est bien calme je ne sais pas.
Ah, je crois qu'il dort !
oui, ça lui arrive de temps en temps.
Heureusement ! Pendant ce temps on en profite pour récupérer un peu...
BANG !
Sophie ! que s'est-il passé ? toutes les vitres ont été brisées !
c'est l'ONDE DE CHOC : ces avions volaient à une vitesse SUPERSONIQUE.
Ils en profitent. La région est peu habitée.

ÉCOULEMENTS SUPERSONIQUES

– Cette **ONDE DE CHOC** qui brise tes vitres est semblable à cette **VAGUE D'ÉTRAVE** qui démolissait ton appontement.

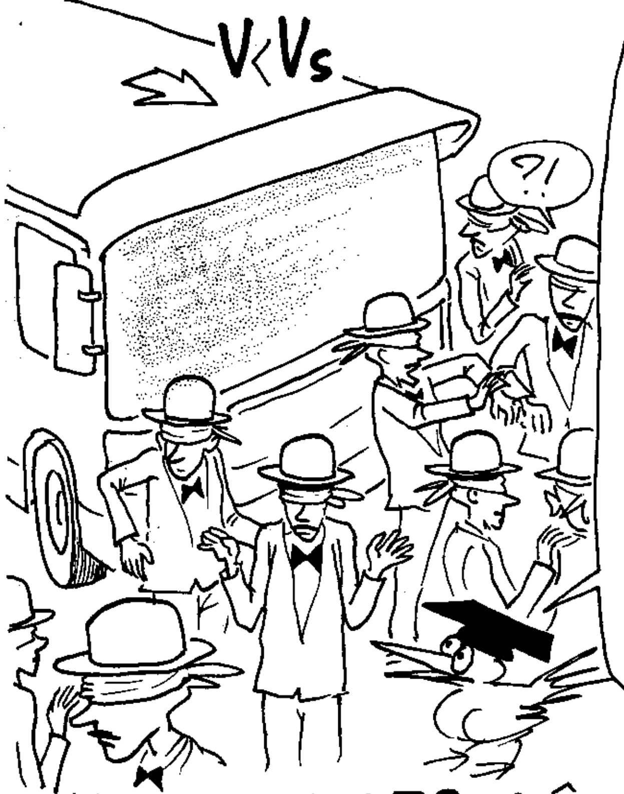
– Tu veux dire... que les avions... font des vagues ?

– En un sens, oui, mais au lieu de créer des vagues de surface, ils créent des **ONDES SONORES**, qui se propagent à la **VITESSE DU SON Vs** (*)

Lorsque le bateau allait à une vitesse **V**, plus élevée que **Vs**, il se crée des **FRONTS D'ONDE**. Mais, quand un avion vole à une vitesse **V** SUPÉRIEURE à la vitesse du SON **Vs**, il crée des **ONDES DE CHOC**.

– Mais, comment, puisqu'il n'y a pas de surface libre ?

– La **DENSITÉ** dans le gaz joue le rôle de la hauteur d'eau. les ONDES DE SURFACE tendaient à maintenir une hauteur d'eau constante. les **ONDES SONORES TENDENT À MAINTENIR UNE DENSITÉ CONSTANTE.** les ondes de choc sont des FRONTS où la densité, la pression et la température sont plus élevées.



Assimilons les molécules à des badauds aux yeux bandés, qui déambulent à vitesse **Vs** de manière totalement incohérente, sur une place, en se bousculant sans cesse (collisions moléculaires). Un objet pénétrant dans le gaz est semblable à cet autocar entrant dans la foule à une vitesse **V**. Si celle-ci est **INFÉRIEURE** à **Vs**, l'information pourra **REMONTER VERS L'AMONT**, et les personnages, avertis de la venue du véhicule **AVANT** qu'il ne soit sur eux, pourront lui **FAIRE PLACE**. Voilà une image d'un **ÉCOULEMENT SUBSONIQUE.**

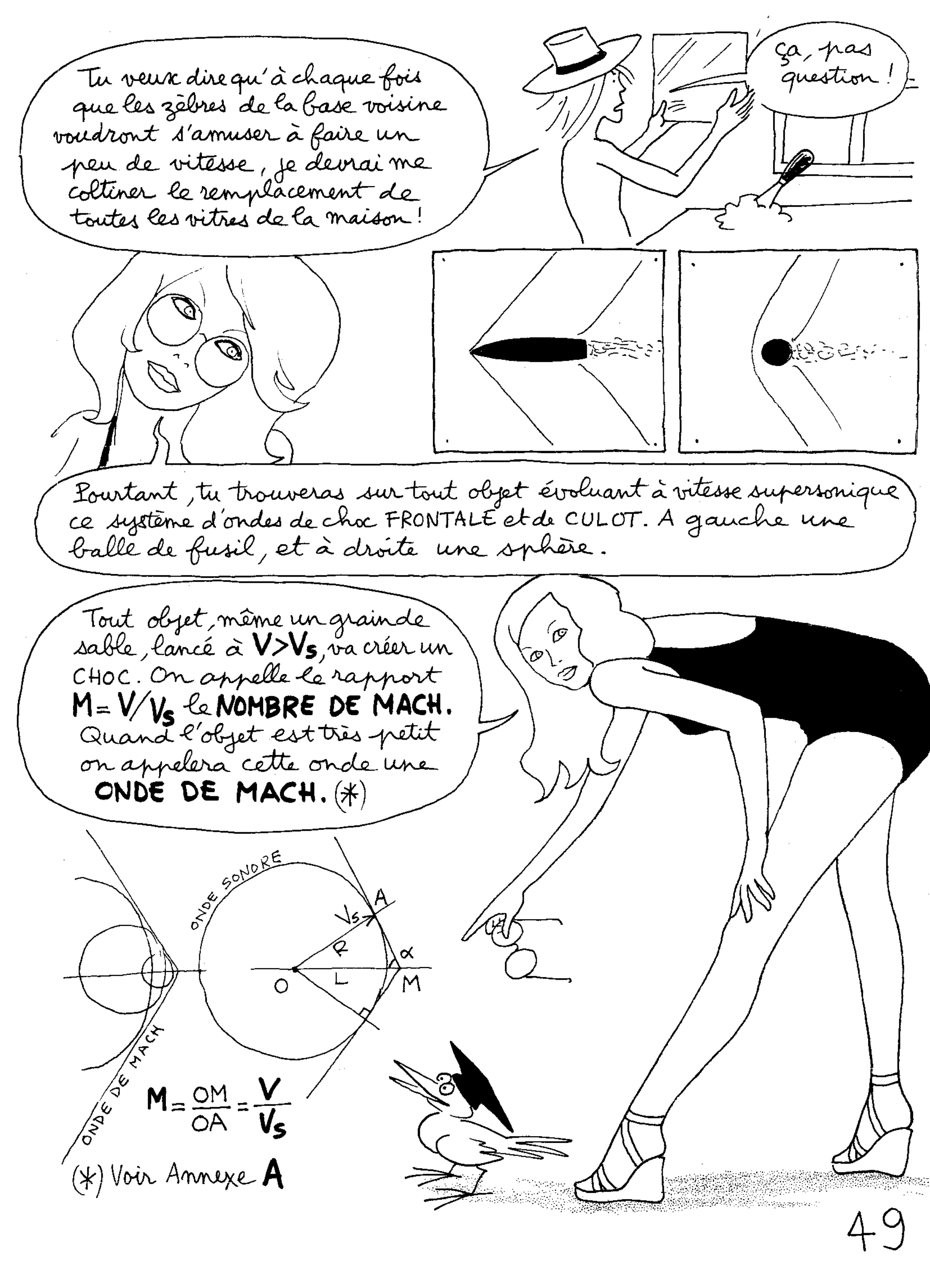
(*) Voir **SI ON VOLAIT ?**, même auteur

MAIS que se passera-t-il si V EST SUPÉRIEUR À Vs ?



L'ONDE DE CHOC




Tu veux dire qu'à chaque fois que les zèbres de la base voisine voudront s'amuser à faire un peu de vitesse, je devrai me coltiner le remplacement de toutes les vitres de la maison !
Ça, pas question !
Pourtant, tu trouveras sur tout objet évoluant à vitesse supersonique ce système d'ondes de choc FRONTALE et de CULOT. A gauche une balle de fusil, et à droite une sphère.
Tout objet, même un grain de sable, lancé à $V>V_s$, va créer un CHOC. On appelle le rapport $M=V/V_s$ le NOMBRE DE MACH. Quand l'objet est très petit on appelera cette onde une ONDE DE MACH. (*)
ONDE SONORE
ONDE DE MACH
A
V_s
R
α
O
L
M
$M=\frac{OM}{OA}=\frac{V}{V_s}$
(*) Voir Annexe A

Dites, à ce que je vois, les écoulements liquides à surface libre ressemblent beaucoup aux écoulements gazeux supersoniques. On retrouve ce qui a été dit page 15 sur les déplacements lents et les déplacements rapides.

MACH 1,5

MACH5

Entre les deux guerres comme il n'y avait pas d'ordinateurs, on "calculait" la forme des ondes de choc avec des cuves à analogie hydraulique.

Fouchtre ! un calculateur à eau !?!..

Il y a, de fait, une grande similitude entre les équations mathématiques décrivant les deux systèmes, et la HAUTEUR D'EAU correspond à la DENSITÉ dans le gaz

Bon, pour étudier tout cela, plus qu'à construire une **SOUFFLERIE SUPERSONIQUE !**

Hélà, attention !

cette fois-ci, vous n'allez pas construire cela dans votre cuisine(*)

Une soufflerie, c'est une autre histoire

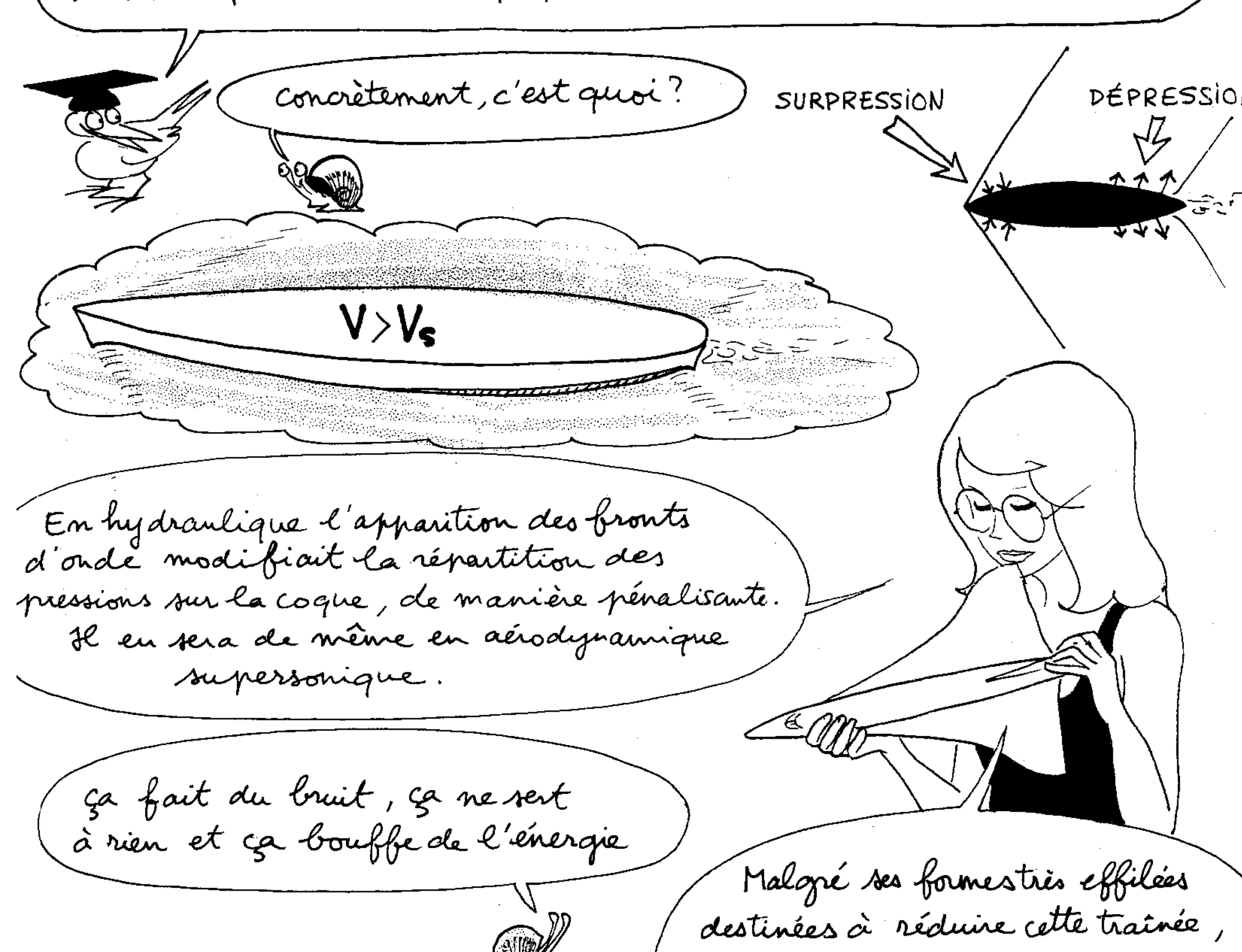
Il faut de gros compresseurs, beaucoup d'énergie !

Des gros moyens, comme ceux du Centre National d'Etudes Spéciales

(*) En France, on n'a pas de pétrole, mais on a des éviers ....

LE MUR DU SON
LE MUR DE LA CHALEUR

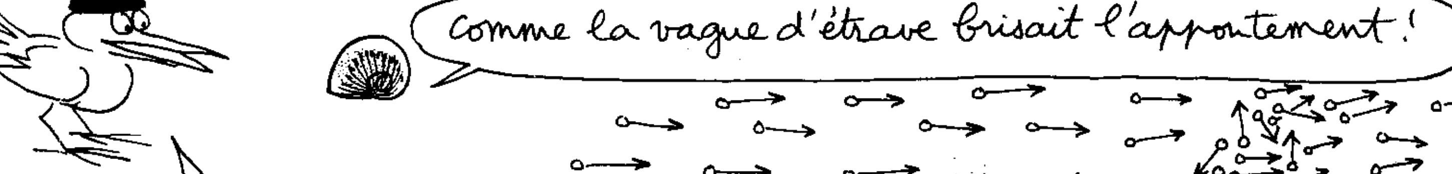
avec une soufflerie supersonique, on pourrait effectivement mettre en évidence un certain nombre de choses. Primo le passage du **MUR DU SON** ($V=V_s$) s'accompagne d'un accroissement de la résistance à l'avancement, de la traînée, du fait de l'apparition d'une **TRAÎNÉE D'ONDE** qui vient se superposer à la **TRAÎNÉE DE FROTTEMENT**



Malgré ses formes très effilées destinées à réduire cette traînée, CONCORDE dépense 40% de son énergie à créer ces ondes de choc.

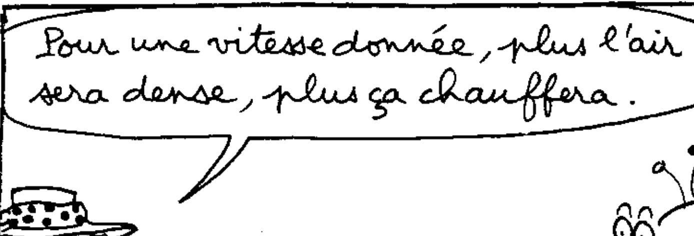
Si on voulait survoler à basse altitude une région habitée à MACH 5 ou 6, l'onde de choc démolirait les toitures

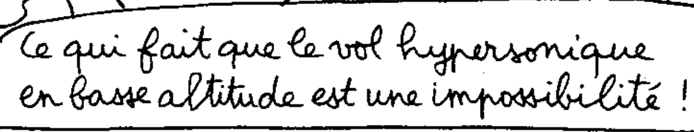
Comme la vague d'étrave brisait l'appontement !



Derrière une ONDE DE CHOC, la DENSITÉ et la PRESSION croissent brutalement, mais aussi la **TEMPÉRATURE**.
La **TEMPÉRATURE ABSOLUE** est la mesure de l'énergie cinétique d'agitation $\frac{1}{2} m v^2$ des molécules.
Si ce gaz "tombe" à une vitesse **V** sur un objet, au point d'arrêt **A** (où le gaz est totalement stoppé) toute cette énergie sera convertie en énergie d'agitation thermique ; ainsi au point **A** la **TEMPERATURE D'ARRÊT** variera comme le carré de la vitesse **V**.









En tout cas, le vol supersonique à basse altitude est, lui, tout à fait possible !... Ne pourrait-on imaginer des avions supersoniques qui ne soient pas des briseurs de vitre...





Pour cela, Anselme, il faudrait des machines qui, en supersonique, ne fassent pas d'ondes de choc.
Ça, mon cher, c'est tout à fait impossible. Sinon il y a longtemps qu'on l'aurait fait !
Voyons. Si le choc se forme, c'est comme pour la vague d'étrave ; c'est parce qu'on ne peut plus agir sur les molécules situées en amont, à l'aide des collisions, par des ondes sonores, en les incitant à laisser le passage. Alors elles s'entassent en une sorte de bourrelet appelé ONDE DE CHOC.
logiquement, en agissant en amont avec des forces de Laplace, le problème du choc doit se poser de manière totalement nouvelle.
Tiresias, regarde cette photo de l'écoulement MHD de la page 30, autour du cylindre. Ne dirait-on pas un effet de succion, sur l'avant ?
N'importe quoi...
C'est vrai, dans les expériences hydrauliques tu arrivais à sucer l'eau sur l'avant au point de créer une dépression
le problème est de savoir jusqu'où on peut étendre l'analogie.
V>Vs


Si l'analogie hydraulique donne des indications valables cela voudrait dire qu'il existerait TROIS FAÇONS DE VOLER.
Lesquelles?
Pour voler, quoi qu'on fasse, cela revient toujours à animer des molécules de gaz d'un mouvement du haut vers le bas
Premier système : je crée le mouvement gazeux à l'aide d'un profil d'aile
Mais, où est l'aile? je ne vois que deux rotors contrarotatifs
Que tu es bête! Un rotor, c'est une aile qui tourne
Ah bon...
Comme cela on met en évidence la VITESSE INDUITE

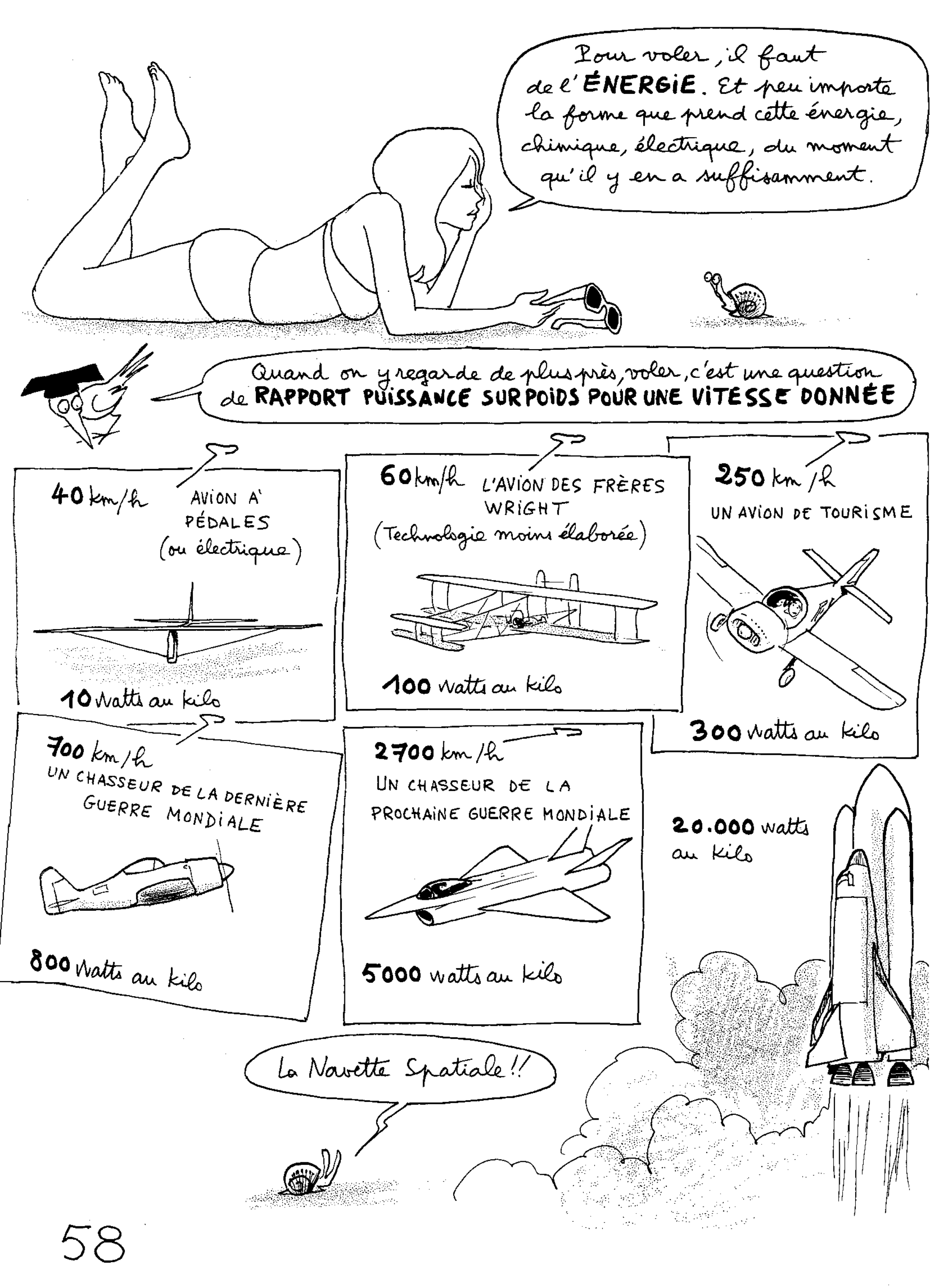


Second système : accélérer un gaz que l'on produit soit-même
FFFFUSCHHHH
Mais, quel est le TROISIÈME système ?
À mon avis, c'est **ASPIRER L'AIR QUI EST AU-DESSUS** à l'aide des forces de Laplace.
Non, mais vous avez entendu ?
Ah, Anselme et Tirésias ensemble, c'est pas mal !
Ils ont complètement décollé, ces deux là, c'est le cas de le dire !
Et Sophie, bien sûr, à la plage !...
Ah... Max a encore un peu de bon sens
quel est votre problème ?
Anselme envisage maintenant je ne sais quoi... de voler avec de l'électricité.
Je disais tout à l'heure à Léon que c'était impossible, car l'air ne conduit pas l'électricité.
c'est même un **ISOLANT**



(*) Soit cent fois plus élevé que celui de l'aimant de la couturière


Sophie ! Viens vite voir ! Avec Anselme, on est en train d'inventer des trucs extra. Comment voler avec de l'électricité !
mon dieu j'arrive
COMPTES RENDUS DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES DE PARIS
Tu imagines la complexité ! À bord, il te faudra un système de refroidissement pour les supraconducteurs, à très basse température, et un générateur électrique de plusieurs centaines de mégawatts. Ça va peser un poids fou !
Autant essayer de faire voler une centrale nucléaire !
voler avec de l'électricité, c'est impossible
Ah bon, alors avec quoi vole cet appareil ?
AVION SOLAIRE
mais, ça n'est pas pareil, il a une hélice...
Et puis il a des cellules solaires !..
mais, qu'est-ce qu'un PROPULSEUR MHD, sinon une sorte d'HÉLICE ÉLECTROMAGNÉTIQUE ?


Pour voler, il faut de l'ÉNERGIE. Et peu importe la forme que prend cette énergie, chimique, électrique, du moment qu'il y en a suffisamment.
Quand on y regarde de plus près, voler, c'est une question de RAPPORT PUISSANCE SUR POIDS POUR UNE VITESSE DONNÉE
40 km/h
AVION A' PÉDALES (ou électrique)
10 watts au kilo
60 km/h
L'AVION DES FRÈRES WRIGHT (Technologie moins élaborée)
100 watts au kilo
250 km/h
UN AVION DE TOURISME
300 watts au kilo
700 km/h
UN CHASSEUR DE LA DERNIÈRE GUERRE MONDIALE
800 watts au kilo
2700 km/h
UN CHASSEUR DE LA PROCHAINE GUERRE MONDIALE
5000 watts au kilo
20.000 watts au kilo
La Navette Spatiale !!

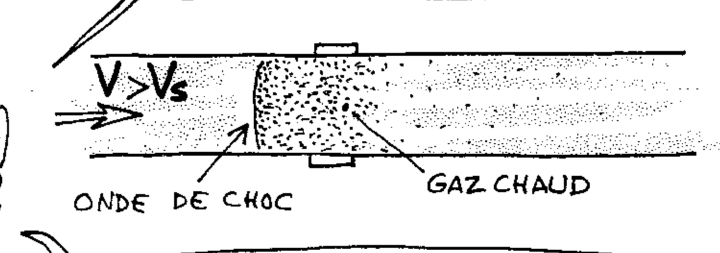

Si je comprends bien, si les centrales nucléaires produisaient un kilowatt d'énergie électrique par kilogramme, elles s'envoleraient spontanément ?!..
Dix tonnes pour cent mégawatts, c'est impossible !..
alors ? Sophie ?
Sacré Lanturlu ! Finalement il semble que l'on puisse étendre dans les gaz ce qui a été élucubré dans les écoulements liquides à surface libre : LE CRITÈRE D'INTERACTION, LE RENDEMENT MHD
Il doit bien y avoir un os quelque part, voyons ...
alors ?
Dans l'expérience de la page 43, un TROP FORT APPORT D'ÉNERGIE provoquait un BLOCAGE
V>Vs

LE BLOCAGE THERMiQUE

Est-ce qu'un phénomène analogue, dans les gaz, ne pourrait pas contrarier l'action MHD ?



En effet, on peut **BLOQUER** un écoulement supersonique de gaz avec de la **CHALEUR**, par effet Joule. Dans une décharge électrique PURE (sans champ magnétique), la boule de gaz chaud se comporte comme un vrai bouchon et une onde de choc se forme.



c'est le **BLOCAGE THERMiQUE**

Alors, l'expérience d'Anselme est vouée à l'échec ?



Ça n'est pas sûr. Tout dépend de la CONDUCTIVITÉ ÉLECTRIQUE de l'air (de celle qu'on pourra lui donner par des moyens variés). Si elle est assez élevée (*), le dégagement de chaleur dans le gaz restera modéré, et on n'aura pas de blocage.

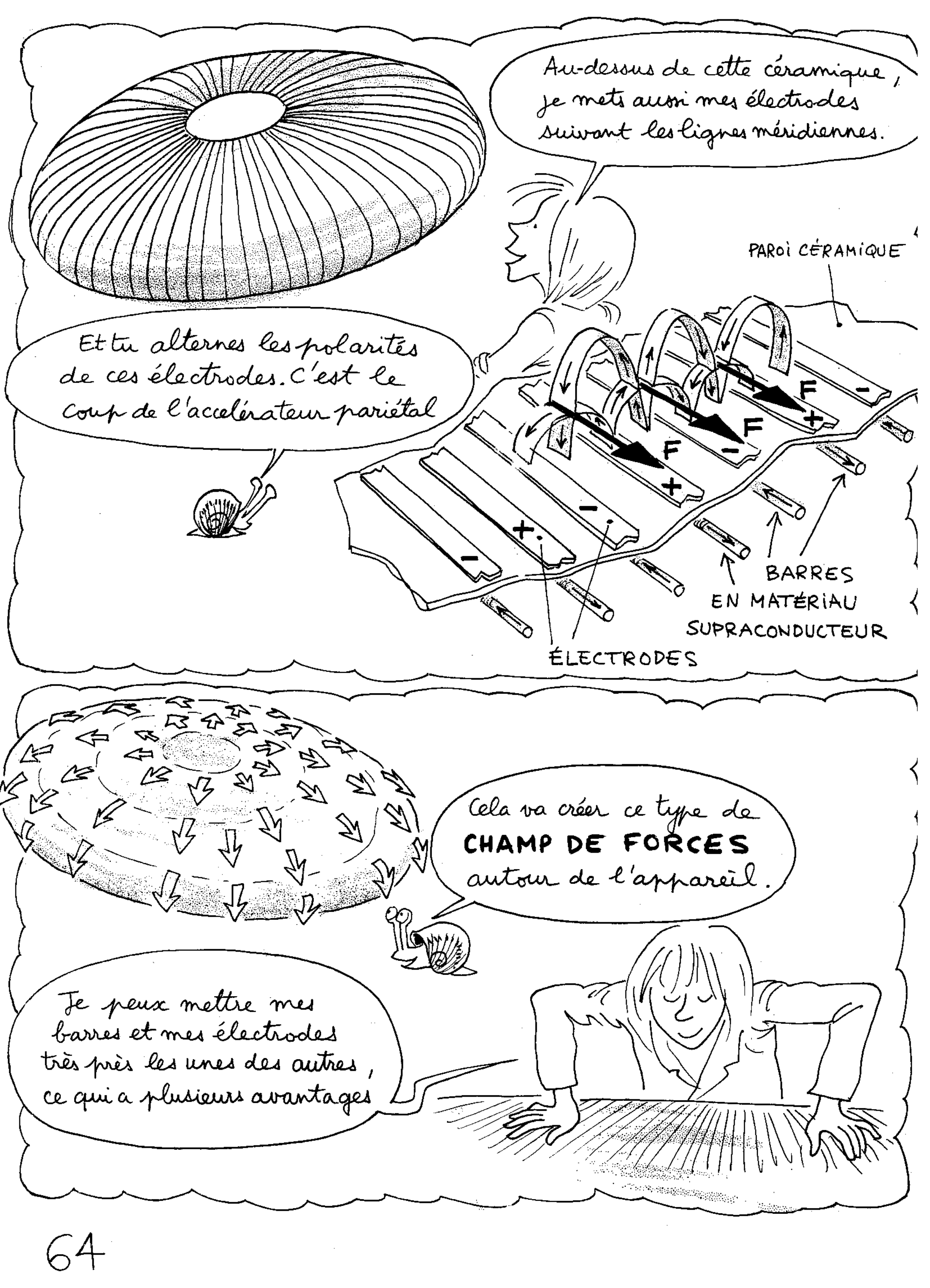
(*) Voir Annexe **E**


Oh, regardez Anselme...
il s'est endormi
tu m'étonnes...
qu'est-ce que vous pensez de tout cela, vous ?
Dans la mesure où ces aérodynes MHD correspondent à une technologie que nous n'aurons peut-être pas dans un siècle, on peut se demander si cela vaut vraiment la peine de se poser ces questions
Sur le plan fondamental cela pourrait être intéressant ?
Oh, vous savez, le fondamental...
Pffff... quelle journée !
Dors, savanturier mon amour

LE SONGE D'ANSELME




Pourquoi est-ce que tu le fais plat, ton aérodyne.
C'est pour mieux exploiter la DÉPRESSION que je vais créer sur le dessus et la SURPRESSION qui s'installera en dessous
On va commencer par s'occuper du CHAMP MAGNÉTIQUE. Avec ce fil supraconducteur, je vais alterner le sens des courants, comme ceci
Dans ces barres parallèles, le courant s'inverse en passant de l'une à l'autre.
Ces barres creuses seront refroidies à très basse température par circulation d'hélium liquide.
⊙⊗ vecteurs perpendiculaires au plan de figure ⊙ pointant vers le lecteur ⊗ ou inversement
On obtient un champ magnétique qui s'inverse tous les d mm.
Ces barres vont suivre les méridiens de l'objet.
Et je les recouvre d'une plaque de céramique mince


Au-dessus de cette céramique, je mets aussi mes électrodes suivant les lignes méridiennes.
Et tu alternes les polarités de ces électrodes. C'est le coup de l'accélérateur pariétal
PAROI CÉRAMIQUE
F
F
F
+
−
+
−
+
−
−
BARRES EN MATÉRIAU SUPRACONDUCTEUR
ÉLECTRODES
Cela va créer ce type de CHAMP DE FORCES autour de l'appareil.
Je peux mettre mes barres et mes électrodes très près les unes des autres, ce qui a plusieurs avantages


Primo, ça limite la tension à appliquer aux électrodes
Secondo, ça permet de limiter le volume où on aura à créer le champ magnétique : Pratiquement, la surface de l'engin, multipliée par le "pas" des barres.
Tertio, ça permet d'agir dans une couche assez mince, en y concentrant l'ionisation, les forces.
Et voilà l'écoulement gazeux qui en résultera.
c'est comme une sorte d'hélicoptère électromagnétique
PRESSIONS
Reste à savoir comment créer l'IONISATION, c'est-à-dire suffisamment d'ÉLECTRONS LIBRES dans cette couche gazeuse
Si tu mets les électrodes à un millimètre l'une de l'autre et si tu balances mille volts, cela sera suffisant pour arracher les électrons des atomes et les libérer. le courant passera

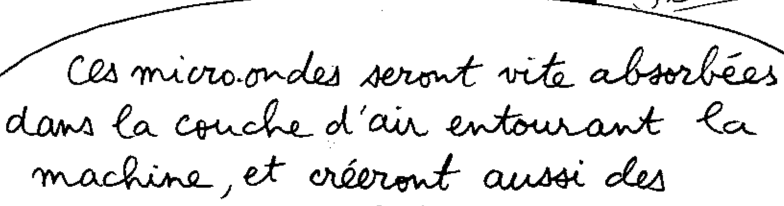
LE PROBLÈME DE L'iONiSATiON

Dans l'air, ce qui fournit les électrons libres, ce n'est pas l'oxygène, ni l'azote, mais l'oxyde d'azote **NO**. Mais j'ai envie carrément d'enrichir l'air avec une substance qui donne plus facilement des électrons libres, comme le Césium ou le sodium.



Alors tu ménages des PORES dans la paroi en céramique, pour lui faire émettre pendant le vol des petites quantités de vapeur de Césium

Anselme a mis à bord un générateur produisant un champ électrique alternatif dans l'air environnant, à très haute fréquence. (trois mille mégahertz)







Couche de PLASMA
trajet d'un élément de gaz
IONISATION
DÉSIONISATION AVEC ÉMISSION DE LUMIÈRE
Bon, je crois que tout y est. Un circuit intérieur de télévision va nous donner, à partir de microcaméras disposées sur la paroi des images de l'extérieur
on met le contact?
qu'est-ce que c'est que ce bazar?
Ionisation!
mais c'est lumineux, rougeâtre..
Nom d'une pipe! Léon et son copain, dehors...
qu'est-ce qu'ils vont ramasser avec les hyperfréquences!
le mieux est de filer au plus vite!
J'ai rentré le train télescopique


c'est marrant, ça se pilote comme un hélicoptère
!?
Sophie !
Sauf qu'au lieu d'agir sur l'incidence des pales tu modifies les courants
Regarde ces deux là. Que leur est-il arrivé. On dirait qu'ils ont vu le diable
C'est bizarre. Comme s'ils avaient subi une commotion...



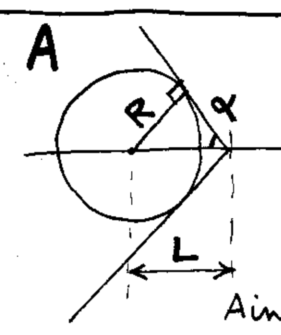
L'AÉRODYNE MHD continue son vol en filant une longue queue de Césium brûlant
Forçons les feux !
Le courant débité augmentant, l'aspect de la machine volante devient celui d'une étoile filante
Dis donc, qu'est-ce qu'on fonce ! on doit être au moins à quatre ou cinq fois la vitesse du son !!!!
Dis donc, Anselme, comme nous contrôlons parfaitement l'écoulement gazeux, nous volons sans turbulence ni onde de choc
Non ?
Possible
DONC SANS BRUIT
il y a eu le MUR DU SON puis le MUR DE LA CHALEUR et là, j'ai bien l'impression que nous avons franchi...

le MUR DU SILENCE

FIN

ANNEXES SCIENTIFIQUES

A



Pendant le temps t, une onde émise s'est propagée radialement selon $R = V_s t$. tandis que l'objet s'est déplacé de $L = Vt$.

Ainsi $\frac{V}{V_s} = \frac{L}{R}$ $\quad \sin\alpha = \frac{V_s}{V} = \frac{R}{L}$

B On agit sur le système d'onde si l'énergie reçue par l'élément de volume qui est **JBL** (travail de la force de Laplace le long de la LONGUEUR D'INTERACTION) est supérieure à l'énergie cinétique $\frac{1}{2}\rho V^2$. Dans l'eau salée l'électrolyse limite **J** à 1A/cm² (10^4 A/m²). Soit V = 8cm/s. Si le cylindre fait ⌀8mm (8×10^{-3} m) ↔ 2mm Avec une longueur d'interaction prise égale à la largeur de l'électrode : 2×10^{-3} m $\rho = 10^3$ kg/m³. Si **B** = 1 tesla (10.000 gauss) le PARAMÈTRE D'INTERACTION est $S = \frac{2JBL}{\rho V^2} = 25$

On annihile la VAGUE D'ÉTRAVE...

C Le bateau a une poussée de 1 gramme. Soit 10^{-3} kg ou 10^{-2} newton. Il avance à 0,1m/s ce qui représente 10^{-3} watt. Le générateur donne du 25 volts, 20 ampères, soit 500 watts. Le rendement est donc $\eta = \frac{10^{-3}}{500} = 2\ 10^{-6}$.

Le fluide transite dans l'accélérateur pendant le temps t. La puissance propulsive sera donc $\frac{JBL}{t}$. Mais $\frac{L}{t}$ est la vitesse V.

Par ailleurs la puissance dissipée par effet Joule est J^2/σ, où σ est la conductivité électrique.

Le rendement est donc $\eta = \frac{JBV}{JBV + J^2/\sigma}$

avec σ = 10 mhos/m
B = 25 teslas
V = 20 m/s
J = 10^4 A/m²

on obtient
$\eta = 0,33$
Le rendement croît avec **V**

D La surpression au point d'arrêt sera, grosso modo $\frac{1}{2}\rho V^2$, où ρ est la masse volumique de l'air (1,3 kg/m³) et **V** la vitesse de déplacement de l'objet.

Pour une surface frontale équivalente de 1 m², la puissance associée à la traînée d'onde serait $\frac{1}{2}\rho V^3$.

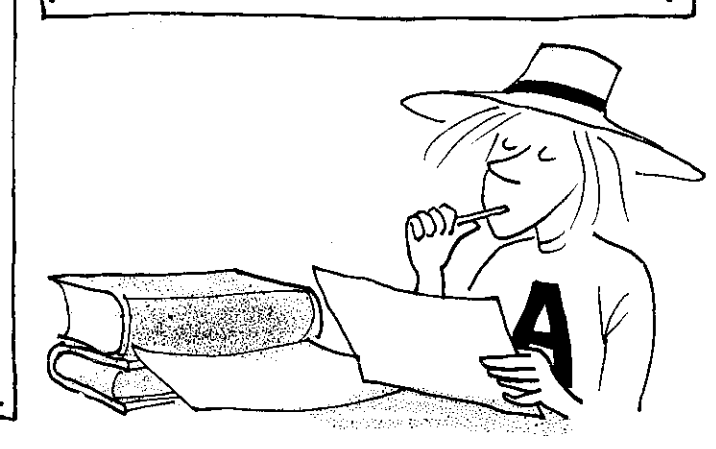
Si **V** = 600 m/s **P** = 140 MW
si **V** = 1500 m/s **P** = 2190 MW

E La puissance associée à l'accélération MHD est **JBV**

Avec **J** = 10^4 A/m², **B** = 4 teslas **V** = 1000 m/s, on a **JBV** = 40 MW/m³.

Si on a une conductivité électrique de l'air (hors d'équilibre) atteignant 10 mhos/m, celle de l'eau salée, alors la chaleur produite par effet Joule J^2/σ correspondra à une puissance de 10 MW/m³. C'est jouable.

On aurait intérêt à travailler à **B** fort (20 teslas) et à accroître artificiellement la conductivité électrique σ (sudation d'alcalin à travers une paroi poreuse ou action de micro-ondes).




Je ne comprends pas. Là où vous cherchez, il n'y a ... rien?


Oui, mais là au moins
il y a de la lumière !